

Instruction Book

L-C PRECISION BRIDGE

Type LCB BN 620

ROHDE & SCHWARZ SALES CO., (USA), INC.
P. O. BOX 148 111 Lexington Ave.
Passaic, N. J. PRescott 3-8010

For drawings, diagrams and table of replaceable parts,
see German instruction book R 7393/761.

Note: Always quote the Type and Order Number (BN) in addition to the
Serial Number (FMr.) of the set when asking for technical information
and, in particular, when ordering repair parts.

Edition R 7400/761

(Translation of the German edition R 7393/761)





Digitized by the Internet Archive
in 2025

Table of Contents

<u>1.</u>	<u>Specifications</u>	3
1.1	Use as Inductance Bridge	3
1.2	Use as Capacitance Bridge	4
1.3	Use as Precision Capacitor	4
1.4	Use as Precision Conductance Element	5
1.5	Dimensions and Weight	5
<u>2.</u>	<u>Uses</u>	6
<u>3.</u>	<u>Description</u>	7
3.1	Inductance Measurement	7
3.2	Capacitance Measurement	9
3.3	Use as a Capacitance or Conductance Standard	9
<u>4.</u>	<u>Operating Instructions</u>	10
4.1	Auxiliary Equipment	10
4.2	Inductance Measurement	10
4.2.1	Connecting the Oscillator and the Null Detector	10
4.2.2	Connection of the Test Item	11
4.2.3	Selecting the Measurement Range	11
4.2.4	Adjusting the Test Voltage	11
4.2.4.1	Power Handling Capacity of the Bridge	11
4.2.4.2	Voltage across the Test Item	12
4.2.5	DC Magnetization	14
4.2.6	Balancing	16
4.2.7	Test Result	21
4.3	Capacitance Measurement	24
4.3.1	Connecting the Oscillator and the Null Detector	24
4.3.2	Connecting the Test Item	24
4.3.3	Selecting the Measurement Range	24
4.3.4	Adjustment of the Test Voltage	24
4.3.4.1	Power Handling Capacity of the Bridge	24
4.3.4.2	Voltage across Test Item	24
4.3.5	Measurement with DC Voltage	26
4.3.6	Balancing	27
4.3.7	Test Result	29
4.4	Use as a Precision Capacitor and Conductance Element	30
	<u>Short Operating Instructions</u>	32
	<u>Translations for the Table of Replaceable Parts</u>	34
	<u>Translations for the Drawings and Diagrams</u>	35-39
	<u>Guarantee</u>	40

R 7400
761
Bl. 2

1. Specifications

Frequency range 50 cps to 20 kc

Input voltage max. 4 v at 50 cps
max. 30 v at 20 kc

Input impedance 10 Ω to 1 k Ω ,
dependent on frequency and range

Output impedance 2 to 10 k Ω ,
dependent on frequency and range

Connectors for bridge input
and output coaxial 13-mm sockets

1.1 Use as Inductance Bridge

The item under test is measured as an ideal inductor in series with a pure resistance.

Measurement range

of inductance 10 μ h to 1000 h

of resistance 10 m Ω to 1 M Ω

in 7 ranges	1 mh	1 Ω	1 h	1 k Ω
	10 mh	10 Ω	10 h	10 k Ω
	100 mh	100 Ω	100 h	100 k Ω
			1000 h	1 M Ω

Accuracy (temperature range +10^o to +30^oC)

of inductance

100 μ h to 10 h better than 0.5%

10 h to 1000 h better than 0.8%

10 μ h to 100 μ h better than 1.1%

in the ranges 100 h and 1000 h and
with $Q < 1$, the curves of Figs. 12
and 13 hold for the accuracy

of series resistance better than $\pm 3\%$ for $Q \leq 100$
for $Q > 100$ see curves of
Figs. 14 to 16

Circuit capacitance in parallel

with the test terminals approx. 10 pf

Inductance in series with test item . approx. 0.08 μ h

DC magnetization is possible.

R 7400
761
Bl. 3

1.2 Use as Capacitance Bridge

The item under test is measured as an ideal capacitor in parallel with a pure conductance.

Measurement range

of capacitance	10 nf to 1000 μ f		
of conductance	10 μ mhos to 1 mho		
in 4 ranges	1 μ f 1 mmho	100 μ f	100 mmhos
	10 μ f 10 mmhos	1000 μ f	1 mho

Accuracy (temperature range $+10^{\circ}$ to $+30^{\circ}\text{C}$)

of capacitance

100 nf to 10 μ f	better than $\pm 0.5\%$
10 μ f to 1000 μ f	better than $\pm 0.7\%$
10 nf to 100 nf	better than $\pm 1.1\%$

for test items with $\tan\delta > 1$ the accuracy for the ranges 10 μ f to 1000 μ f can be seen from the curves of Figs. 21 to 23

of conductance	better than $\pm 3\%$ for $\tan\delta \geq 10^{-2}$; for $\tan\delta < 10^{-2}$ see curves of Fig. 24
--------------------------	--

Inductance in series with test item . approx. 0.08 μ h

A DC voltage may be applied to the capacitor to be measured. For permissible values see section 4.3.5, page 27.

1.3 Use as Precision Capacitor

Range	100 pf to 1 μ f
adjustable in 4 decades	12 x 100 pf 10 x 1 nf 10 x 10 nf 10 x 100 nf

Accuracy (temperature range $+10^{\circ}$ to $+30^{\circ}\text{C}$)

Decades 10 x 100 nf and 10 x 10 nf . .	better than $\pm 0.3\%$
Decade 10 x 1 nf alone	better than $\pm 0.3\%$
Decade 10 x 1 nf together with decade 12 x 100 pf	better than $\pm 1\%$
Decade 12 x 100 pf	better than $\pm 1\%$

When connecting the conductance decades in parallel, a capacitance uncertainty of $\leq \pm 30$ pf is added.

For the range $+15$ to $+25^{\circ}\text{C}$ the tolerances should be multiplied by 0.7.

Inductance in series with capacitor . less than 0.45 μ h

Dissipation factor

decades 10 x 1 nf to 10 x 100 nf . . approx. 3×10^{-4} (polystyrene)

decade 12 x 100 pf approx. 10^{-3} (ceramic)

An additional series resistance of max. 20 m Ω , due to wiring, etc., should be taken into account.

Max. voltage 50 v rms

1.4 Use as Precision Conductance Element

Range 0.1 μ mho to 1 mmho

adjustable in 4 decades 11 x 0.1 μ mho
11 x 1 μ mho
11 x 10 μ mhos
11 x 100 μ mhos

Accuracy (and power handling capacity)

Decade 11 x 100 μ mhos alone better than $\pm 0.3\%$ (3 w)
together with the other decades
better than $\pm 0.7\%$

Decade 11 x 10 μ mhos alone better than $\pm 1.2\%$ (0.5 w)
together with smaller conductance
values better than $\pm 1.5\%$

Decade 11 x 1 μ mho alone better than $\pm 1.7\%$ (0.25 w)
together with decade 11 x 0.1 μ mho
better than $\pm 2.8\%$

Decade 11 x 0.1 μ mho better than $\pm 5.5\%$ (0.1 w)

These values hold for a temperature range of $+10^{\circ}$ to $+30^{\circ}\text{C}$; for the range $+15^{\circ}$ to $+25^{\circ}$ the tolerances should be multiplied by 0.7.

The capacitor and the conductance element are in parallel so that any capacitive impedance can be simulated in the specified range.

1.5 Other Data

Dimensions 470 x 275 x 260 mm
(R&S Standard Cabinet 46)

Weight 12 kg

R 7400
761
Bl. 5

2. Uses

The rapid and accurate measurement of the inductance of chokes, transformers, etc. is often difficult even in well equipped laboratories. Mostly either of these requirements was somewhat neglected. To combine high accuracy with ease of operation was the main aim in the development of the L-C Precision Bridge Type LCB.

This bridge is mainly designed for inductance measurements. The inductance range extends up to 1000 henrys, permitting even unusual measurements to be made. The item under test is measured as a series circuit made up of an ideal inductance and a pure resistance. After bridge balancing the values of the inductance and of the resistance are separately available as direct readings. Hence it is possible to determine lossy inductances as well as impedances with inductive components. Direct current may be applied to the test item during the test, if necessary. This is a desirable feature if the measurement is to be made on a transformer which under actual working conditions is operated with DC magnetization. Inductance measurement is not the only application of this bridge. After changeover of the range switch, the instrument operates as a capacitance bridge. Importance has been attached to ensure that high capacitance values are measurable. The active and reactive components are again read separately and directly, just as in inductance measurements.

Multiple utilization of the precision components contained in the L-C Precision Bridge Type LCB is possible. Most of the built-in capacitors and resistors are externally accessible via a switch position. Thus the instrument can also be used as an adjustable capacitance or conductance. The great number of switching possibilities is justified only when errors are not easily committed thereby. Simplicity of operation has been ensured by suitable design of the operating controls (automatically jumping decimal point). The results or settings are directly indicated as a figure if the bridge is used as a capacitance or conductance. No calculations are necessary.

R 7400
761
Bl. 6

3. Description

3.1 Inductance Measurement

In inductance measurement, the Type LCB operates as a Maxwell bridge according to Fig. 1. The two opposite arms 1-2 and 3-0 are formed by the fixed resistors R_1 and R_2 . The variable standards, namely the decade capacitance standard C_N and the decade conductance element G_N in shunt with it, are connected in arm 2-3. The test item is measured as a series connection of an inductance L_x and a resistance r_x . The conditions for bridge balance are:

$$L_x = R_1 \times R_2 \times C_N \quad (1)$$

$$r_x = R_1 \times R_2 \times G_N \quad (2)$$

Fig. 3 shows the simplified circuit diagram and Fig. 4 the complete circuit diagram of the bridge. The input voltage is applied via socket (1) (see Fig. 5) and transformer Tr1 to the bridge points 2-0. The transformation ratio of the transformer is 1.1; its primary winding is shielded. The bridge resistances R_1 and R_2 are made up of bifilar wire-wound resistors of $\pm 0.05\%$ tolerance. When the range switch S1 (12 in Fig. 5) is operated the appropriate values are obtained automatically. The pointer in the window (11) indicates the selected range. The value of R_1 is switched by bay VI, that of R_2 by bay V of the step switch S1. In some of the L ranges the bridge resistances are combined with coils and capacitors. These compensate for the unavoidable phase errors of the resistances and improve the accuracy of the bridge.

The decade capacitor C_N is operated by the switches S2 to S5 (7 to 10 in Fig. 5), S2 switching $11 \times 0.1 \mu\text{f}$, S3 $11 \times 10 \text{ nf}$, S4 $11 \times 1 \text{ nf}$, and S5 $12 \times 100 \text{ pf}$. Apart from the decade $12 \times 100 \text{ pf}$, all capacitors use as dielectric styroflex, which has a dissipation factor $\tan\delta \approx 3 \times 10^{-4}$, and are adjusted to within $\pm 0.1\%$. The last decade consists of ceramic capacitors with $\tan\delta \approx 10^{-3}$ and an accuracy of $\pm 0.1\%$. Since the wiring capacitance should not be neglected at low capacitance values, it has been included in the calibration. Because of this capacitance there is no 0-pf value in the Type LCB, but the lowest setting of C_N is 100 pf.

To save the user of the Type LCB the calculation (1), the unit of inductance (μh , mh , h in window (6) of Fig. 5) is changed together with the

range by the range switch S1 and the white dot (5), indicating the decimal point, is shifted between the windows (4) displaying the figures.

The decade conductance element G_N is switched by S6 to S9: S6 switches $11 \times 0.1 \text{ mmho}$, S7 $11 \times 10 \text{ } \mu\text{mhos}$, S8 $11 \times 1 \text{ } \mu\text{mho}$, S9 $11 \times 0.1 \text{ } \mu\text{mho}$. As in L measurement, the range switch S1 again ensures that the numerical value of r_x , the white dot (14) for the decimal point, and the appropriate unit $\text{m}\Omega$, Ω or $\text{k}\Omega$ in window (15) appear above the knobs (16) to (19). This saves the calculation according to equation (2). The conductance elements of the decade $11 \times 0.1 \text{ mmho}$ are made up of bifilar wire-wound resistors and adjusted to within 0.05%. The other conductance elements consist of deposited-carbon resistors with tolerances of 0.5%, 1%, and 2%.

Connect the test item to the terminals (20) marked "x". One terminal is marked by the earth symbol and directly connected to the housing of the Type LCB. In inductance measurement, the switch contact S1I is closed. Thus the housing is also connected to the bridge resistance R_2 (bridge arm 3-0 in Fig. 1).

The output voltage is present between the points 1-3. It is derived via transformer Tr2 (S1II-IV closed). The primary and the secondary wiring are carefully shielded from each other to prevent stray voltages from penetrating into the receiver by capacitive coupling. Such a capacitance would cause the bridge to appear unbalanced and the result to be in error. The transformer is so designed that its capacitances lie at accurately determined points and remain independent of frequency. Its transformation ratio, counted from points 1-3 to the output socket, is 2.16.

An RC section, inserted between Tr2 and the output socket (3), keeps the output impedance constant over the entire frequency range.

In the AC lead to the bridge circuit proper, the transformer Tr1 is followed by the pair of sockets (2), which are normally connected with each other. Direct current can be fed to these sockets for magnetization of the coil core, as shown in Fig. 3. The DC source must be by-passed by a capacitor in order that the source impedance does not attenuate the alternating current.

The direct current fed in is branched at the bridge point 0 to the series arrangements (test item + R_1) and $(R_2 + C_N \parallel G_N)$. Capacitor C3 inserted

R 7400
761

Bl. 8

between S1II and Tr2 prevents a second branching via transformer Tr2. For L measurement with DC magnetization see section 4.2.5, page 14.

3.2 Capacitance Measurement

For C measurement, switch the Type LCB according to Fig. 2 as a Wheatstone bridge. The arms 1-2 and 2-3 are made up of fixed resistors; the variable standards lie in arm 3-0. The conditions for balance are:

$$C_x = C_N \times \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

$$G_x = G_N \times \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

The bridge resistances R_1 and R_2 , made up of bifilar precision resistors, are switched, like in the L range, by the bays VI and V of switch S1. S1I separates the connection between the X chassis terminal and R_2 ; S1III connects chassis to the standards C_N and G_N . Window (11) displays the selected range, (6) indicates the unit nf or μ f, and the white dot (5) between the figures (4) indicates the decimal point, so that no calculation according to equations (3) and (4) is necessary. The standards C_N and G_N are the same as for L measurement. All values adjusted for appear in the windows (4) and (13).

Connect the test item to the terminals (20); one terminal is directly connected to the housing of the Type LCB.

The voltage is brought out via the same elements as in the L range. DC voltage may be applied to the capacitor under test via terminals (2). However, special precautions should be taken to ensure that the bridge is not damaged by overloading. For details refer to section 4.3.5.

3.3 Use as a Capacitance or Conductance Standard

As mentioned in section 2, the standards C_N and G_N may also be used independently of the bridge circuit. Switch S1VI connects the parallel arrangement C_N and G_N to the X terminals. S1II and IV disconnect the remaining part of the circuit. One terminal remains connected to the housing. The values of C_N are adjustable between 0.1 nf and 1.1112 μ f and of G_N between 0.1 μ mho and 1.1111 mmho. They can be read in the windows mentioned earlier.



4. Operating Instructions

Please read the following description to become acquainted with the Type LCB. After some practice, the short operating instructions on pp. 32 and 33 will be sufficient.

4.1 Auxiliary Equipment

A suitable oscillator and a null detector are needed to operate this bridge. We recommend the R&S RC Generator Type SRM (30 cps to 300 kc) and the Tunable Indicating Amplifier Type UBM. For voltage measurement across the test item we recommend the R&S AF Millivoltmeter Type UVN BN 12001 with 1 MΩ input impedance.

4.2 Inductance Measurement

4.2.1 Connecting the Oscillator and the Null Detector

Use coaxial cables with 13-mm connectors FS 413/11 to connect the Type LCB to the oscillator and the null detector. Take care that the outer conductor makes good contact to keep the mutual impedance as low as possible. Otherwise stray voltages may leak into the detector and disturb the balancing. Since both the oscillator and the detector are provided with power plugs having neutral conductors, care should be taken, in particular at test frequencies which are in the vicinity of the AC supply frequency, that no hum pickup is caused. For example, if the power plugs of the oscillator and of the detector are plugged into distant wall sockets and a current flows through the neutral conductor, then hum pickup may take place. To eliminate this danger it is best to connect both power plugs to closely adjacent wall sockets.

Shortly after switching on, adjust the oscillator for the desired test frequency. As for the value of the test voltage, see section 4.2.4. Next tune the detector to the test frequency. When the R&S Tunable Indicating Amplifier Type UBM is used, its highest sensitivity and selectivity should be utilized in any case by increasing the feedback until the oscillations are almost initiated (see instruction book for Type UBM).

Should in exceptional cases no selective indicating amplifier be available, then a broadband valve voltmeter may be used. Then a low-pass or band-pass filter should be inserted between the oscillator and the bridge input to suppress oscillator harmonics. The filter, is however, ineffective if the test item is so strongly magnetized that it causes harmonics itself. Generally we therefore advise against the use of broadband indicators.

R 7400
761
Bl. 10



4.2.2 Connection of the Test Item

Connect the test item to the terminal marked (20) in Fig. 5. Connect the earthed end of the coil to the left-hand terminal, which is marked by the earth symbol.

4.2.3 Selecting the Measurement Range

The measurement range can be selected with the knob (12) (see Fig. 5) and is indicated by the pointer (11). If the inductance is not known approximately, select a medium range. When making the balance you will soon be aware whether the range is suitable or not. To make full use of the accuracy of the bridge, the lowest possible measurement range should always be chosen.

4.2.4 Adjusting the Test Voltage

An upper limit is set to the bridge input voltage by

the magnetic loading capacity of the input transformer,

the power handling capacity of the bridge resistors,

the magnetic loading capacity of the test item;

the lower limit is set by the sensitivity of the indicator.

4.2.4.1 Power Handling Capacity of the Bridge

Taking account of the power handling capacity of the input transformer and of the bridge resistors, one obtains the voltage values plotted in Fig. 6 as a function of frequency. These values are valid if the coil under test has no DC magnetization. In the case of DC magnetization, refer to section 4.2.5. The sum of AC and DC applied to the bridge resistor R_1 should not amount to more than 10 w. This requirement is probably fulfilled automatically in the measurement of the reversible permeability μ_{rev} , since the amplitude of the AC field h_{max} should be small as compared to the DC field H_{max} , so that only the direct current has a loading effect on the resistor.

If, however, high AC field intensity is required for a measurement, then the power in R_1 can be calculated as follows:

R 7400
761
Bl. 11



$$P_{1\sim} = 1.2 E_1^2 \times R_1 \left(\frac{R_1 + r_x}{(R_1 + r_x)^2 + (\omega L_x)^2} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_{1=} = I_x^2 \times R_1 \quad (6)$$

E_1 = bridge input voltage

I_x = direct current flowing through the test item.

The values of (5) and (6) together should not make more than 10 w. Since the power in R_1 will always be somewhat lower than 10 w because of the transformer losses, there is practically no risk of overloading the bridge.

4.2.4.2 Voltage across the Test Item

The magnitude of the voltage across the test item is usually of no importance for air coils and coils for which the greatest part of the magnetic flux runs through air.

High-permeability cores with a closed or almost closed magnetic circuit must be measured at a defined field strength to give reproducible values.

The field strength in a closed magnetic circuit is generally

$$H_{\max} = 0.4 \pi \times I_{\max} \times n/l \quad [\text{Oe}] \quad (7)$$

$$H_{\max} = I_{\max} \times n/l \quad [\text{amp turns}] \quad (8)$$

$I_{\max}$ = peak value of AC

n = number of turns

l = length of lines of force in cm

When the core has an air gap and perhaps different cross sections, the field strength is, of course, not equal in the individual parts of the path of the lines of force; but generally it is not necessary to know the individual field strength values. For the measurements it is sufficient to know the total field strength; the total path of the lines of force is to be inserted for l in equations (7) and (8).

If the current $I_{\max}$ is not known, but only the voltage $E_{\max}$, then the equations (7) and (8) take the form

R 7400
761
Bl. 12



$$H_{\max} = 0.4 \pi \frac{E_{\max}}{\sqrt{(\omega L_x)^2 + r_x^2}} \frac{n}{1} \quad [\text{Oe}] \quad (9)$$

and

$$H_{\max} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{(\omega L_x)^2 + r_x^2}} \frac{n}{1} \quad [\text{amp turns}] \quad (10)$$

r_x^2 can often be neglected in the calculation.

The current $I_{\max}$ in the coil can be measured if an accurately-known deposited-carbon resistor R is connected in series with the test item and the voltage drop E_{rms} is measured across the resistor. The current is then

$$I_{\max} = \frac{E_{\text{rms}}}{R} \sqrt{2} \quad [\text{v}] \quad (11)$$

The resistor R , whose value should be small compared to the impedance of the test item at the test frequency, for example 1Ω or 10Ω , need not be short-circuited during the measurement. The value R is simply subtracted from the reading r_x' : $r_x = r_x' - R$.

The voltage E_{rms} must be measured with a sensitive valve voltmeter since $I_{\max}$ may be very low. The resistor R and the earthed terminal of the voltmeter should be connected to that terminal for the test item which is connected to chassis, in order that the voltmeter operates satisfactorily.

The maximum adjustable r_x value in the L range 1 mh is 1.1111Ω . Since series resistors below 1Ω will not be used, the described method will seldom be employed here. Then the voltage E_x must be measured directly across the test item.

If the voltmeter impedance is high as compared to the impedance of the coil, which is 130Ω at the most in the range 1 mh, the voltmeter need not necessarily be disconnected during the measurement. In this case a short shielded line should be used in order to avoid that the hand of the operator influences the test circuit. After the bridge has been balanced, the voltage should be checked again.

The current and voltage measurements can be correct only if the current and voltage are sinusoidal. If the magnetizing current of the coil is so high that appreciable distortion occurs, then a selective voltmeter should be used which indicates only the fundamental wave. For example, the R&S AF Wave Analyzer Type FTA is a suitable set.

R 7400
761
Bl. 13



If coils are measured at very low field strength, then the sensitivity of the indicator may be insufficient to obtain satisfactory balance of the bridge. Nomographs for the determination of the bridge output voltage have been calculated to give the user of the Type LCB the possibility of estimating the voltages in such cases. The use of the nomographs is explained in section 4.2.6.

4.2.5 DC Magnetization

The Type LCB also permits inductance measurements while the test item is being magnetized by a direct current fed to the terminals (2) (see Fig. 5). The arrangement of the DC source is shown in Fig. 3 and briefly described in section 3.1.

The direct current, which can be calculated from the desired DC magnetization,

$$I = \frac{H_{0e} \times l}{0.4 \pi n} \quad (12)$$

or

$$I = \frac{H_{\text{amp turn}} \times l}{n} \quad (13)$$

is measured by the ammeter "I". Since the current in the bridge branches off through $(R_2 + 1/G_N)$, the current indicated by "I" is not in all cases equal to the current in the test item. The ratio of the total current I_t to the current through the test item is

$$\frac{I_t}{I_x} = \gamma = \frac{\alpha (R_1 + R_-)}{R_1 + \beta \times R_-} + 1 \quad (14)$$

where α = bridge ratio in the measurement range (Table 1, page 15)

β = ratio of AC resistance r_x to DC resistance R_- in the coil under test: $\beta = r_x/R_-$

R_1 = bridge resistance in the measurement range.

The relation (14) is shown graphically in Fig. 7, β being parameter.

$\gamma = I_t/I_x$ is plotted as a function of the measured resistance r_x .

The current to be fed to the terminals (2) is then

$$I_t = I_x \times \gamma \quad (15)$$

R 7400
761
Bl. 14



Table 1

Range	R_1	Bridge ratio α
		R_1/R_2
1 mh	10 Ω	10^3
10 mh	31.62 Ω	10^4
100 mh	100 Ω	10^5
1 h	316.2 Ω	10^6
10 h	1 k Ω	10^7
100 h	10 k Ω	10^8
1000 h	31.62 k Ω	10^9
		R_2/R_1
1 μ f	100 Ω	1
10 μ f	100 Ω	10^1
100 μ f	100 Ω	10^2
1000 μ f	10 Ω	10^3

Table 2

Range	$E_{\max}$	$I_{\max}$
1 mh	150 v	1.00 amp
10 mh	190 v	0.50 amp
100 mh	190 v	0.30 amp
1 h	225 v	0.15 amp
10 h	250 v	0.10 amp
100 h	250 v	0.03 amp
1000 h	250 v	0.01 amp

The direct current through the coil may also be measured with an ammeter connected directly in series with the test item. It must, however, be by-passed by a capacitor the impedance of which is negligible against that of the coil. Since the ammeter "I" at the side of the terminals (2) cannot be dispensed with in order to avoid overloading of the bridge resistors, the first method is in general preferable. The voltages and currents permissible at the terminals (2) are listed in Table 2. They are calculated for maximum loading of 10 w of the bridge elements. Current and voltage must be checked simultaneously since neither value must exceed the maximum.

If measurements must frequently be made with DC magnetization, it is advisable to design a power supply with such an open-circuit voltage and source impedance that the bridge is not damaged even if a wrong setting is made by mistake. The block diagram of a suitable set is shown in Fig. 8,

R 7400
761
Bl. 15



data are given in Table 3. The set should have four ranges, which are selected in accordance with the inductance ranges.

Table 3

Range	Max. EMF (Open-circuit voltage)	Z (Source impedance)	Max. loading of Z
1 mh	20 v	10 Ω	1 amp
10/100 mh	60 v	100 Ω	0.6 amp
1/10 h	200 v	1 k Ω	0.2 amp
100/1000 h	340 v	10 k Ω	35 ma

For adjustment of the current it is advisable to vary the open-circuit voltage; this can be done, for example, by means of a variable transformer at the AC side of the power supply.

While taking care about DC loading, you should not forget that the AC power also develops heat in the bridge resistance R_1 . As mentioned in section 4.2.4.1, the DC and AC powers together should not be more than 10 w.

4.2.6 Balancing

After the bridge voltage has been correctly adjusted, adjust the sensitivity of the indicator so that the pointer is in the second quarter of the scale. Vary the L_x decades with the knobs (7) to (10) and the r_x decades with the knobs (16) to (19) until the pointer deflection becomes zero. Shortly before the pointer deflection disappears, increase the sensitivity of the indicator until the pointer is again in the second quarter of the scale.

Depending on the sensitivity of the indicator, one finally reaches a balancing position where either the pointer deflection disappears completely or a residual voltage which cannot be compensated for remains.

When the pointer deflection is zero, check whether the pointer deflects if the lowest L_x and r_x decades are varied by one step. If this is not the case, then the sensitivity of the indicator is insufficient. In this case the accuracy of the bridge cannot be put to use because the last

R 7400
761
Bl. 16

decades do not contribute to the test result. Try to obtain an indication of the bridge output voltage by using a more sensitive indicator, connecting two receivers in cascade, or, if possible, by increasing the bridge input voltage.

A residual voltage at the bridge output can be due to various causes:
a spurious voltage,
the number of steps for the L_x balance is insufficient,
the number of steps for the r_x balance is insufficient.

To check whether a spurious voltage is the cause for the residual unbalance voltage, disconnect the plug from the signal-generator output socket and connect the outer conductor of the cable with the signal-generator housing, so that only the centre conductor is interrupted. The pointer deflection on the indicator should then disappear. Otherwise, a spurious voltage must be assumed to leak in, for example through an earth loop via the three-contact sockets or through a poor contact in a coaxial connector of the connecting cables.

In measurements where either L_x or r_x is so small that only the last decade steps can be used for balancing, a residual voltage remains necessarily since the bridge cannot be fully balanced. The accuracy of the measurement is naturally affected thereby. This is explained in more detail in section 4.2.7. Should it be indispensable to eliminate the residual voltage, then a calibrated variable capacitor or a variable resistor can be connected across the terminals for the test item and used to improve the balance. The C or R setting must then be taken into account in the calculation. Because of the possibilities of error involved, this method is recommended only for exceptional cases, the more so since the balancing elements of the Type LCB always provide for satisfactory balance with normal test items.

The nomographs of Figs. 9 and 10 permit the determination of the bridge output voltage. Their use is explained in the following.

If the bridge is brought out of balance by a given amount $\Delta L_x / L_x$ with the L decades, e.g. by $\Delta L_x / L_x = 0.001$, i.e. 0.1%, the voltage measured at the output is

$$E_{2L} = E_1 \frac{\Delta L_x}{L_x} K \quad (16)$$

R 7400
761
Bl. 17



where

$$K = u_1 u_2 \frac{\omega L_x R_1}{(r_x + R_1)^2 + (\omega L_x)^2} \quad (17)$$

Eq. (16) is valid for $\Delta L_x / L_x \leq 0.2$.

E_1 = voltage at the input socket of the Type LCB

E_{2L} = voltage at the output socket of the Type LCB

R_1 = bridge resistance according to Table 1

u_1 = transformation ratio of the input transformer, $u_1 = 1.1$

u_2 = transformation ratio of the output transformer, $u_2 = 2.16$.

If, however, one leaves the L balance and varies r_x from balance by a given amount $\Delta r_x / r_x$, e.g. by 0.01 (1%), then the output voltage is

$$E_2 = E_1 \frac{\Delta r_x}{r_x} \frac{1}{Q} K \quad (18)$$

where Q = quality of the coil, $Q = \omega L_x / r_x$

K = see Eq. (17) and Figs. 9 and 10.

In practice, Eq. (16) offers the following possibilities:

- (a) It can be found out whether with a given bridge input voltage E_1 the output voltage E_2 can be indicated by the indicator or whether the sensitivity is too low. In addition to E_1 , it must be known which percentage of unbalance of L_x ($\Delta L_x / L_x \times 100$) or r_x ($\Delta r_x / r_x \times 100$) is to be measured. This percentage is approximately equal to the required accuracy of measurement. If, for example, an accuracy of 0.5% is desired for the L_x value, then the indicator must show an appreciable deflection when the bridge is unbalanced by $\Delta L_x / L_x = 0.005$. The bridge input voltage E_1 , which enters into the calculation, can be determined on the one hand by the maximum oscillator output and on the other hand by the voltage requirement E_x across the test item. E_1 can be calculated from

$$E_1 = \frac{E_x}{1.1} \frac{\left(\frac{r_x + R_1}{\omega L_x} \right)^2 + 1}{\sqrt{\left(\frac{r_x (r_x + R_1)}{(\omega L_x)^2} + 1 \right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_x} \right)^2}} \quad (19)$$

R 7400
761
Bl. 18

- (b) If the Q of the coil is so high that sufficient steps are not available for balancing the small r_x value, then the last balanced r_x step gives an output voltage E_2 which is substantially greater than that caused by the residual L_x unbalance. The r_x voltage then masks the L_x voltage and the L_x balance becomes unsharp. This can also be calculated by equation (16).
- (c) In measurements where the Q is very small the opposite case of (b) may occur, namely that the residual L_x voltage masks the r_x voltage and makes the minimum unsharp.

For graphical determination of the bridge output voltage the factor K of Eq. (17) is plotted in Fig. 9 for the range 1 mh to 1 h and in Fig. 10 for 10 h to 1000 h, as a function of the inductance L_x' . Fig. 9 is valid for a frequency of 1 kc, Fig. 10 for 50 cps. The coil $Q = \omega L_x / r_x$ is the parameter.

For frequencies which differ from 1 kc or 50 cps, multiply the probable L value of the coil by the ratio test frequency/1 kc or test frequency/50 cps and find the factor K for the resulting inductance L_x' .

To determine the output voltage of the Type LCB,

you should know: the inductance L_x to be expected

the test frequency f

the coil $Q = \omega L_x / r_x$ to be expected

the amount of unbalance $\Delta L_x / L_x$ which should be detectable

the amount of unbalance $\Delta r_x / r_x$ which should be detectable

(both amounts of unbalance should be below 0.2)

the bridge input voltage E_1 ;

multiply the L_x value to be expected

in the ranges 1 mh to 1 h by the frequency f in kc

in the ranges 10 h to 1000 h by $\frac{f/\text{cps}}{50}$.

Thus one obtains $L_x' = L_x f$ or $L_x' = L_x f/50$.

Draw a perpendicular through L_x' until it cuts the curve valid for the frequency range and the coil Q .



Draw a parallel to the abscissa through the point of intersection; this parallel gives the value K on the ordinate.

The output voltages are

for L_x unbalance:

$$E_{2L} = K \frac{\Delta L_x}{L_x} E_1 \quad (16)$$

for r_x unbalance:

$$E_{2r} = \frac{K}{Q} \frac{\Delta r_x}{r_x} E_1 \quad (18)$$

1st example:

$$L_x = 0.2 \text{ mh (range 1 mh)}$$

$$f = 10 \text{ kc}$$

$$Q \approx 100 (r_x \approx 0.12 \Omega)$$

$$\text{Desired accuracy for } L_x: \Delta L_x / L_x \times 100 = 1\% (10^{-2})$$

$$\text{Desired accuracy for } r_x: \Delta r_x / r_x \times 100 = 5\% (5 \times 10^{-2})$$

$$E_1 = 1 \text{ v}$$

$$L_x' = L_x \times f/\text{kc} = 2 \text{ mh}$$

One finds: $K = 1.2$

$$\text{and calculates: } E_{2L} = K \times \Delta L_x / L_x \times E_1 = 1.2 \times 10^{-2} \times 1 = 12 \text{ mv}$$

$$E_{2r} = K/Q \times \Delta r_x / r_x \times E_1 = 1.2/100 \times 5 \times 10^{-2} \times 1 = 500 \text{ } \mu\text{v}$$

The indicator must therefore give a visible deflection at 500 μv . For measurement of an inductance of 0.2 mh, the balance can be achieved not only with the desired accuracy of 1% but even down to 0.1 μh , i.e.

$$\frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{10^{-7}}{2 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^{-4}$$

The resulting bridge voltage is

$$E_{2L}' = 1.2 \times 5 \times 10^{-4} \times 1 = 600 \text{ } \mu\text{v}.$$

If the bridge is balanced more accurately, i.e. not only within 1% but to 0.1 μh or $\approx 0.05\%$, then the voltages E_{2L} and E_{2r} are of the same order and do not mask each other. The minimum is then very sharp.

R 7400
761
Bl. 20



2nd example:

$$L_x = 20 \mu h$$

$$f = 10 \text{ kc}$$

$$Q \approx 100 (r_x \approx 12 \text{ m}\Omega)$$

$$\text{Desired: } \frac{\Delta L_x}{L_x} \times 100 = 1\% (10^{-2})$$

$$\text{Desired: } \frac{\Delta r_x}{r_x} \times 100 = 5\% (5 \times 10^{-2})$$

$$E_1 = 1 \text{ v}$$

$$\text{one finds: } K = 2.8 \times 10^{-1}$$

$$\text{and calculates: } E_{2L} = K \times \frac{\Delta L_x}{L_x} \times E_1 = 2.8 \times 10^{-1} \times 10^{-2} \times 1 = 2.8 \text{ mv}$$

$$E_{2r} = \frac{K}{Q} \times \frac{\Delta r_x}{r_x} \times E_1 = \frac{2.8 \times 10^{-1}}{100} \times 5 \times 10^{-2} \times 1 = 140 \mu v$$

L_x is adjustable not only within 1% but down to $0.1 \mu h / 20 \mu h = 5 \times 10^{-3} \approx 0.5\%$. With the L_x decades carefully adjusted, there remains a residual bridge voltage of

$$E_{2'L} = 2.8 \times 10^{-1} \times 5 \times 10^{-3} \times 1 = 1.4 \text{ mv.}$$

This voltage is ten times greater than E_{2r} . As a result, the r_x adjustment cannot be made with an accuracy of 5% because the r_x minimum is masked by $E_{2'L}$.

4.2.7 Test Result

The measured values, inductance L_x and series loss resistance r_x , can be read immediately in the windows (4) and (13) (see Fig. 5). The units appear in the windows (6) and (15); the dot (5) or (14) indicates the decimal point.

The standards used in the Type LCB present by nature certain errors, for example a balancing error, temperature dependence and phase error. The sum of these errors determines the accuracy of measurement of the bridge.

R 7400
761
Bl. 21



A uniform indication of tolerance is not possible because of the manifold character of the errors. All errors have been covered by charts, where the accuracy may be found even for extraordinary measurements.

Figs. 11 to 13 show the inductance accuracy for the temperature range $+10^{\circ}$ to $+30^{\circ}\text{C}$ when coils of an unknown inductance are measured. Since only the magnitude of the possible error is given, these values cannot be used for the correction of the results.

These curves take account of the fact that with low values of L_x a step error occurs due to the limited number of adjustable L_x decades. If, for example, an inductance of $10\ \mu\text{h}$ is to be measured, L_x can be obtained with the knob in the lowest range only to within $\pm 0.1\ \mu\text{h}$, i.e. $0.1/10 \times 100 = 1\%$. Since half a step, $0.05\ \mu\text{h}$, can possibly be estimated, the step error will amount to about 0.5% . The calculation of the curves has been based on this assumption that the last half step can be estimated. When adjusting coils to a value of L which is set at the Type LCB, the step error is necessarily eliminated, so that the measurement error decreases by the value of $\pm 5 \times 10^{-2} L_{\text{max}}/L_x [\%]$. (L_{max} = nominal value of the selected measurement range, L_x = measured inductance).

The L_x errors are independent of frequency in the entire frequency range of the Type LCB. In the ranges 1 mh to 10 h the magnitude of the loss resistance r_x is of no importance. These losses have an effect only in the upper two ranges, 100 h and 1000 h, where they are used as parameters.

The error of the loss-resistance measurement depends in a very complicated way on frequency, measurement range, inductance and on the magnitude of the resistance itself. Nomographs for the determination of the r_x errors are given in Figs. 14 to 16. The accuracy is determined as follows:

- (a) Find the expected L_x value on the horizontal L_x axis (in the example of Fig. 14: 3 mh).
- (b) Draw a perpendicular through L_x until it cuts the oblique straight line referring to the given measurement range (in the example: 10 mh).
- (c) Draw a parallel to the L_x axis through the intersection until it cuts the family of straight lines marked by frequency scales.
- (d) In the ranges 1 mh to 10 h, 3 frequencies are assigned to each straight line; the frequency scale first runs from left to right, then turns round and runs to the left, and finally again returns to the right. In

R 7400
761
Bl. 22



the ranges 100 h and 1000 h only one frequency is associated with each straight line. Find the intersection of the horizontal auxiliary line with the frequency line valid for the test frequency (in the example 5 kc).

- (e) Draw a perpendicular through this intersection up to the upper field.
- (f) Each curve in the upper field is associated with an r_x parameter, the value of which still depends on the measurement range. Find the expected r_x value on the r_x scale (in the example $r_x = 2 \Omega$) and follow the curve until it cuts the perpendicular auxiliary line coming from the lower field.
- (g) Draw a horizontal line from the intersection to the ordinate and read the r_x error (in the example 1.5%).

The errors which are found from the Figs. 14 to 16 are determined exclusively by the bridge. The test item may also cause errors by its inherent capacitance. The closer the test frequency is to the resonance frequency of the resonant circuit formed by the inductance and capacitance of the coil, the greater becomes the error. The inductance measured is always too great. The error F can be calculated if the coil capacitance C_c is known.

$$F = + \frac{\omega^2 L_x C_c}{1 - \omega^2 L_x C_c} \quad (20)$$

The error has been calculated for the test frequencies of 50 cps and 1 kc; it is represented graphically in Figs. 17 and 18. Parameter is the total capacitance C_t which is composed of the coil capacitance and the wiring capacitance of the Type LCB. Eq. (20) and the curves are valid only for coils having a Q higher than 10. For test items of lower Q the relation is more complicated. In any case the curves may serve estimate the order of magnitude of the possible error. For coils of $Q \geq 10$ the result L_{meas} read from the Type LCB can be corrected if C_t is known with sufficient accuracy.

$$L_{\text{true}} = \frac{L_{\text{meas}}}{1 + \omega^2 L_{\text{meas}} \times C_t} \quad (21)$$

where $C_t = C_c + \text{wiring capacitance of the Type LCB (10 pf)}$.

The series inductance of the wiring of the Type LCB, as mentioned in section 1.1, is so small that it does not contribute to the error of the measurement.

R 7400
761
Bl. 23



4.3 Capacitance Measurement

4.3.1 Connecting the Oscillator and the Null Detector

Refer to section 4.2.1.

4.3.2 Connecting the Test Item

Connect the capacitor to be measured to the terminals (20) (see Fig. 5). Connect the earthed connector or that which is taken to chassis in operation to the terminal marked by the earth symbol, which is directly connected to the housing of the Type LCB.

4.3.3 Selecting the Measurement Range

Select the measurement range with knob (12); the pointer (11) indicates the range. If the capacitance value to be expected is not known, select a medium range. When making the balance you will soon be aware whether it is necessary to change over to another range. Always select the lowest possible range in order to make full use of the accuracy of the bridge.

4.3.4 Adjustment of the Test Voltage

An upper limit is set to the test voltage by the power handling capacity of the bridge; the lower limit is determined by the sensitivity of the null detector.

4.3.4.1 Power Handling Capacity of the Bridge

For the maximum permissible bridge input voltage refer to Fig. 6.

4.3.4.2 Voltage across Test Item

In measurements of paper capacitors, styroflex capacitors, etc. the voltage across the test item is generally of no importance, since it cannot be greater than 30 v because of the limited bridge input voltage.

If electrolytic capacitors or other voltage-sensitive items are measured, a defined voltage must be used in order that the results are reproducible.

R 7400
761
Bl. 24



The voltage can be measured directly at the terminals (20) if a high-impedance valve voltmeter is used, e.g. the R&S AF Millivoltmeter Type UVN. Only in measurements of capacitances below 1 μf or of $\tan\delta$ values below 0.1 care should be exercised since the bridge may be unbalanced by the input impedance of the voltmeter. In this case it is preferable to measure the bridge input voltage, since for high-impedance test items it is approximately equal to the voltage across the test item. The exact relation between the input voltage E_1 and the voltage E_x across the capacitor under test can be calculated from

$$\left| \frac{E_1}{E_x} \right| = 0.91 \sqrt{(1 + G_x R_1)^2 + (\omega C_x R_1)^2} \quad (22)$$

E_1 = bridge input voltage

E_x = voltage across test item

C_x = measured or estimated capacitance of test item

G_x = measured or estimated conductance of test item

R_1 = bridge resistance according to Fig. 2 and Table 1 (page 15).

Equation (22) will be used, in particular, to determine the input voltage required to obtain a given voltage across the test item. Under unfavourable conditions it may happen that the required bridge voltage exceeds the limit permissible in the Type LCB (see Fig. 6). In such a case useless trials and a possible overloading of the bridge can be avoided.

If the ratio $\left| \frac{E_1}{E_x} \right|$ has to be determined often, use the nomograph of Fig. 19. The voltage E_x or E_1 is then found as follows:

(a) Given are:

the estimated or measured capacitance C_x

the estimated or measured conductance G_x

the test frequency f

E_1 or E_x

(b) Left-hand chart:

Find the value G_x on the G_x axis (in the example 10 mmhos) and draw a perpendicular through it, which cuts the curve $A = F(G_x)$, taking account of the measurement range. Read the value A on the ordinate to the left (in the example $A = 4.0$).

R 7400
761
Bl. 25



(c) Right-hand chart:

Find the C_x value on the C_x axis (in the example 2 μ f) and draw a perpendicular, which cuts the oblique straight line valid for the test frequency f . Read the value B on the ordinate to the right (in the example $B = 6.3$).

(d) Add the value A , found according to (b), to the value B .

(e) Find the value $(A + B)$ (in the example $A + B = 10.3$) on the right-hand ordinate and draw a parallel to the C_x axis until it cuts the oblique straight line $\left| \frac{E_1}{E_x} \right| = F(C_x)$. Draw a perpendicular through the intersection, which cuts the upper $\left| \frac{E_1}{E_x} \right|$ axis, and read the $\left| \frac{E_1}{E_x} \right|$ value (in the example $\left| \frac{E_1}{E_x} \right| = 2.8$).

(f) The unknown voltage E_x or E_1 is then found from

$$E_x = \frac{E_1}{\left| \frac{E_1}{E_x} \right|} \quad (23)$$

$$E_1 = E_x \left| \frac{E_1}{E_x} \right| \quad (24)$$

Depending on the test frequency, the value of E_x will be somewhat lower than according to Eq. (23), since the input transformer of the bridge causes attenuation. Below 1 kc the loss amounts to about 10%, above this frequency it increases rapidly, in particular with low-impedance items.

4.3.5 Measurement with DC Voltage

Although the capacitance of electrolytic capacitors can be measured without DC voltage if the AC voltage does not exceed a few tenths of a volt, it will sometimes be necessary to apply a DC voltage to the test item. This is possible with the Type LCB if certain precautions are taken.

Apply the DC voltage to the terminals (2) (see Fig. 5), to which the direct current is fed for inductance measurements. The circuit arrangement is shown in Fig. 3; insert a suitable fuse since the capacitor may break down during the measurement. In this case the bridge resistor R_1 would burn through. The rating of the fuse is found in Table 4. Because of

R 7400
761
Bl. 26



the uncertain cut-off at small overloading, the rating of the fuse should be smaller than the maximum permissible direct current. Table 4 also indicates the permissible voltage and current values which should not be exceeded.

Table 4 DC voltage for capacitance measurements
Permissible voltages and currents

Range	E _{max}	I _{max}	Fuse rating
1 µf	140 v	0.3 amp	0.16 amp
10 µf	210 v	0.3 amp	0.16 amp
100 µf	250 v	0.3 amp	0.16 amp
1000 µf	250 v	1.0 amp	0.6 amp

4.3.6 Balancing

The bridge balance is made by alternately varying the C_x decades with the knobs (7) to (10) and the G_x decades with the knobs (16) to (18). For details see section 4.2.6.

The bridge output voltage for a given amount of unbalance can be calculated from

$$E_{2C} = E_1 \frac{\Delta C_x}{C_x} K \quad (25)$$

where

$$K = u_1 \times u_2 \times \frac{\omega C_x \times R_1}{\sqrt{(G_x R_1 + 1)^2 + (\omega C_x R_1)^2}} \quad (26)$$

and

$$E_{2G} = E_1 \frac{\Delta G_x}{G_x} K \tan \delta_x \quad (27)$$

E₁ = voltage at the input socket of the Type LCB

E_{2C,G} = voltage at the output socket of the Type LCB

R₁ = bridge resistance according to Fig. 2 and Table 1

u₁ = transformation ratio of the input transformer, u₁ = 1.1

u₂ = transformation ratio of the output transformer, u₂ = 2.16

7400
61
1. 27



$\Delta C_x / C_x$ = amount of C_x unbalance

$\Delta G_x / G_x$ = amount of G_x unbalance

$\tan \delta_x$ = dissipation factor of test item

The equations (25) and (27) are used in the same way as described in section 4.2.6. The factor K of equation (26) is plotted in Fig. 20. The output voltage can be determined from this chart in the following way:

(a) Required are:

capacitance value C_x to be expected

test frequency f

dissipation factor $\tan \delta_x$ to be expected for the test item

C_x unbalance $\Delta C_x / C_x$ which is to be detectable

G_x unbalance $\Delta G_x / G_x$ which is to be detectable

$$\left(\frac{\Delta C_x}{C_x} \text{ and } \frac{\Delta G_x}{G_x} \leq 0.2 \right)$$

bridge input voltage E_1

(b) Multiply the C_x value to be expected by the factor

$$\frac{\text{test frequency (cps)}}{50};$$

one obtains

$$C_x' = C_x \times f/50$$

(c) Draw a perpendicular through C_x' until it cuts the curve valid for the measurement range and the dissipation factor of the test item.

(d) Draw a parallel to the abscissa through the intersection; this parallel cuts the ordinate at the value K .

(e) The output voltages are:

$$C_x \text{ unbalance: } E_{2C} = K \quad \Delta C_x / C_x \times E_1 \quad (25)$$

$$G_x \text{ unbalance: } E_{2G} = K \quad \tan \delta_x \quad \Delta G_x / G_x \times E_1 \quad (27)$$

R 7400
761
Bl. 28



4.3.7 Test Result

The measured values, capacitance C_x and parallel conductance G_x , can be read immediately in the windows (4) and (13) (see Fig. 5). The units appear in the windows (6) and (15); the dots (5) and (14) indicate the decimal point.

The accuracy of the measurement of unknown capacitances is shown in Figs. 21 to 23. The curves are valid for a temperature range of $+10^\circ$ to $+30^\circ\text{C}$. These curves are based on the same considerations as the L_x error curves described in section 4.2.7.

The accuracy of G_x is shown in Fig. 24. To determine the possible error of G_x proceed as follows:

- (a) Find the expected C_x value on the horizontal C_x axis (in the example of Fig. 24: 5 μf).
- (b) Draw a perpendicular through C_x until it cuts the oblique straight line valid for the measurement range (in the example: 10 μf).
- (c) Draw a parallel to the C_x axis through the intersection until it cuts the family of straight lines marked by the frequency scales.
- (d) Draw a perpendicular through the point of intersection with the straight line valid for the desired test frequency; this perpendicular extends into the upper field.
- (e) A G_x parameter, depending on the measurement range, is associated with each curve of the upper field. Find the expected G_x value on the G_x scale (in the example: 200 μmhos) and follow the corresponding curve until it cuts the perpendicular line coming from the lower field.
- (f) Draw a horizontal line from the intersection to the ordinate and read the G_x error on the ordinate (in the example: 2.5%).

The accuracy of C_x according to Figs. 21 to 23 is independent of frequency between 50 cps and 20 kc. In measurements of high capacitances at frequencies above 500 cps an additional error is caused by the inductance of the wiring of the Type LCB. This inductance is about 0.08 μh and causes the capacitance to appear too high. The error in % amounts to

R 7400
761
Bl. 29



$$F_C = \frac{C_{\text{meas}} - C_{\text{true}}}{C_{\text{true}}} \cdot 10^2 = \frac{\omega^2 L C_{\text{true}}}{1 - \omega^2 L C_{\text{true}}} \times 10^2 [\%] \quad (28)$$

C_{meas} = measured C_x value

C_{true} = true C_x value

L = inductance of the wiring (for the Type LCB: 0.08 μh)

Equation (28) is valid if the dissipation factor of the test item $\tan\delta_x \leq 0.1$.

The error is plotted in Fig. 25. The result can be corrected, if required, so that even unusual measurements can be made. Since the inductance of the wiring of the set can be specified only within $\pm 10\%$, it is, of course, not possible to reach the same accuracy as in measurements at low frequencies. If $\tan\delta_x \leq 0.1$, then

$$C_{\text{true}} = \frac{C_{\text{meas}}}{1 + \omega^2 C_{\text{meas}} L} \quad (29)$$

With greater $\tan\delta_x$ values correction is impossible because of the complicated interdependence of the quantities.

The capacitance of the wiring of the Type LCB is about 10 pf; this small value cannot cause an error in the C_x ranges.

4.4 Use as a Precision Capacitor and Conductance Element

Set the switch (12) for the C STANDARD range. The pair of terminals (20) is then connected to the parallel arrangement of a capacitor variable between 0.1 nf and 1.1112 μf and a conductance element variable between 0.1 μmho and 1.2221 mmho.

The C and G values adjusted for are visible in the windows (4) and (13), the units appear in the windows (6) and (15), the dots (5) and (14) indicate the decimal points.

As can be seen from the specifications of sections 1.3 and 1.4, the tolerances for the individual C and G decades are not equal, since in bridge measurements, for which the standards are primarily intended, the

R 7400
761
Bl. 30



accuracy of the last decade could not be put to use because of the step error (see section 4.2.7). For this reason partly elements with wider tolerances are used. The accuracy for the C decades is given in Fig. 26, for the G decades in Fig. 27.

When using the decade capacitor, note that the maximum permissible voltage is $50 \text{ v}_{\text{rms}}$; for the decade conductance element consider the power handling capacities for the individual decades.

The wiring inductance, which is in series with the decade capacitor in the Type LCB, is about $0.45 \text{ } \mu\text{h}$ max., depending upon the setting. This inductance causes the capacitance to appear greater. The error can be calculated by equation (28). It is appreciable only at frequencies above 2 kc. The chart of Fig. 25 permits a rough determination of the error, if the error is not taken for the value C but for $C' = 0.45 \text{ } \mu\text{h} / 0.08 \text{ } \mu\text{h} \times C = 5.6 \times C$.

The dissipation factor of the decade $12 \times 100 \text{ pf}$ is approximately 1×10^{-3} , for the other decades it is about 3×10^{-4} . If the capacitor is used at a frequency above 1 kc, it may be necessary to take into account the wiring resistance of the Type LCB. The wiring resistance is about $20 \text{ m}\Omega$ and, for example at $C = 1 \text{ } \mu\text{f}$ and $f = 2 \text{ kc}$, causes an additional dissipation factor

$$\tan \delta \approx \frac{2 \times 10^{-2} \Omega}{80 \Omega} = 2.5 \times 10^{-4}.$$

R 7400
761
Bl. 31



SHORT OPERATING INSTRUCTIONS

for the L-C Precision Bridge Type LCB
(see Fig. 5 of the German Instruction Book)

1. L and C Measurements

- 1.1 Using coaxial cables connect oscillator to (1), tunable indicating amplifier to (3).
- 1.2 Switch the oscillator on and adjust it for the desired test frequency; do not exceed the maximum permissible bridge input voltage; see Fig. 6.
- 1.3 Adjust the tunable indicating amplifier to maximum sensitivity and tune it to the test frequency.
- 1.4 Connect the test item to (20); connect the earthed connector to the left-hand terminal.
- 1.5 Select the measurement range by means of knob (12); select a medium range if the L value or the C value of the test item is entirely unknown; otherwise choose the lowest possible range for reasons of maximum accuracy.
- 1.6 Adjust the bridge input voltage (voltage of test item); see sections 4.2.4 and 4.3.4 of the instruction book. Not critical with air coils, cores with large air gaps and normal capacitors. Critical with coils with high-permeability laminates, ferrite core coils and with electrolytic capacitors.
- 1.7 If necessary, feed current or voltage to (2) for magnetization or biasing. Observe the maximum permissible voltages and currents; see table 2 on page 15 of the instruction book.
- 1.8 Balance the bridge by alternately varying knobs (7) to (10) and (16) to (19); check for minimum of the bridge output voltage. Start always with the highest value (knob (7) or knob (16)). Decrease the sensitivity of the indicating amplifier correspondingly. After balancing, check the voltage of the test item, if necessary.

R 7400
761
Bl. 32



1.9 Read the L or C value in windows (4) and (6) with the decimal point in window (5).

Read the r and G values in windows (13) and (15) with the decimal point in window (14).

1.10 Accuracy:

for $L_x > 100 \mu h$ $\lesssim 0.5\%$, exact values see Figs. 11 to 13

for r_x $\lesssim 3\%$, exact values see Figs. 14 to 16

for $C_x > 100 nf$ $\lesssim 0.5\%$, exact values see Figs. 21 to 23

for G_x $\lesssim 3\%$, exact values see Fig. 24

2. The Type LCB Used as a Precision Capacitor or Conductance Element

2.1 Set switch (12) to C STANDARD.

2.2 Connect C and G in parallel to (20). Observe maximum voltage or load; 50 v_{rms} for C; for G see page 5, section 1.4.

2.3 Accuracy:

for C see Fig. 26

for G see Fig. 27

2.4 Dissipation factor:

Decade 12 x 100 pf $\tan \delta \approx 1 \times 10^{-3}$

Other decades $\tan \delta \approx 3 \times 10^{-4}$

Translations for the Table of Replaceable Parts

Abgesch. Doppelleitung	Twin wire, shielded
Änd.-Zust. "d" Nr. 5788	Modification "d" No. 5788
Ausgangsübertrager	Transformer, output
Benennung	Designation
Bereichschalter	Switch, range
bzw.	Or
Eingangsübertrager	Transformer, input
etwa enth. in	Approx. Incl. in
Hochfr.-Kabel	Cable, RF
in Serie	In series
Kennzeichen	Reference number
Keramikkondensator	Capacitor, ceramic
Kf-Kondensator	Capacitor, synth. foil
Meßschalter	Switch, CHECK
MP-Kondensator	Capacitor, MP
R&S-Sach-Nr.	R&S Stock No.
Schaltteilliste	Table of replaceable parts
Scheibentrimmer	Trimmer, disc
Schichtwiderstand	Resistor, depos. carbon
Spule	Coil
Styroflexkondensator	Capacitor, styroflex
Wert	Ratings
Widerstand	Resistor

R 7400
761
Bl. 34



Translations for the Drawings and Diagrams

Bild 1

Prinzipschaltung
Selbstinduktionsmeßbrücke

Fig. 1

Simplified diagram
Inductance bridge

Bild 2

Kapazitätsmeßbrücke

Fig. 2

Capacitance bridge

Bild 3

Vereinfachte Schaltung der L-C-
Präzisionsmeßbrücke Type LCB

Ausgang Eingang

160 mA im Bereich 1...100 μ F

Gleichstromvormagnetisierung bzw.
Gleichvorspannung

Fig. 3

Simplified diagram of the L-C Preci-
sion Bridge Type LCB

Output Input

160 ma in the range 1 to 100 μ f

DC magnetization or DC voltage

Bild 4

L-Messung C-Messung

C-Normal

Chassis von Frontplatte isoliert
Frontplatte

Bereich mS S

für S5 gilt

anstatt

Für Gleichstromvormagnetisierung

Eingang Ausgang

Fig. 4

L measurement C measurement

C standard

Chassis insulated from front panel
Front panel

Range mmho mho

For S5 holds

Instead of

For DC magnetization

Input Output

Bild 5

L-C-PRÄZISIONSMESSBRÜCKE

Eingang

Bei 50 Hz maximal 4 V

Gleichstrom-Vormagnetisierung

$U_{\max}$ und $J_{\max}$ nicht überschreiten

C-NORMAL L-MESSUNG

Ausgang Bereich-Endwerte

Fig. 5

L-C PRECISION BRIDGE

Input for 50 cps maximum 4 v

DC magnetization

Do not exceed $E_{\max}$ and $J_{\max}$

C standard L measurement

Output Range limit values

Bild 6

Maximal zulässige Brücken-Eingangs-
spannung

Fig. 6

Maximum permissible bridge input
voltage

R 7400
761
Bl. 35



Brücken-Eingangsspannung U_1

Bridge input voltage E_1

Meßfrequenz

Test frequency

Hz kHz

Cps kc

Bereich

Range

Bild 7

Fig. 7

Stromverhältnisse bei Gleichstrom-Vormagnetisierung des Meßobjektes

Current conditions with DC magnetization of the test item

Erforderlicher Einspeisestrom

Required feed current

I_{ges}

I_t

Wechselstromwiderstand

AC resistance

Gleichstromwiderstand

DC resistance

Faktor Bereiche

Factor Ranges

Wechselstrom-Widerstand

AC resistance

Bereich

Range

Bild 8

Fig. 8

Regeltransformator

Variable transformer

Netz Netzgerät

AC supply Power supply

E zur LCB

EMF To Type LCB

E- und R_1 -Umschaltung

Switching facility for EMF and source impedance

Bild 9

Fig. 9

Nomogramm zur Ermittlung der Brückenausgangsspannung (1 kHz)

Nomograph for determining the bridge output voltage (1 kc)

Bereiche

Ranges

L_x -Verstimmung: $U_2 = U_1$

L_x unbalance: $E_2 = E_1$

Bei $f \neq 1$ kHz ist K über $L'_x = f_{kHz} \cdot L_x$ aufzusuchen

If $f \neq 1$ kc, find K for L'_x for $L'_x = f_{kc} \times L_x$

und

And

Bild 10

Fig. 10

Prinzipschaltung siehe Bild 9

Simplified diagram see Fig. 9

Hz

Cps

For missing expressions see Fig. 9

R 7400
761
Bl. 36



Bild 11

L-Fehler in den Bereichen 1 mH...
10 H

Temperaturbereich +10°...+30°C
Kurve gültig für alle r-Werte

L-Fehler in %

Induktivität

Fig. 11

L error in the ranges 1 mh to 10 h
temperature range +10° to +30°C;
the curve is valid for all values of r

L error in %

Inductance

Bild 12 und 13

L-Fehler im Bereich 100 H

For missing expressions see Fig. 11

Figs. 12 and 13

L error in the range 100 h

Bild 14, Bild 15, Bild 16

r_x -Meßfehler in den L-Bereichen
1 mH...100 mH

Meßbeispiel

Fehler Bereich

r_x -Parameter, gültig jeweils für
eine Kurve

L-Bereiche 1 mH und 10 mH

kHz Hz

r_x -Fehler in %

Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16

Error in r_x for the L ranges
1 mh to 100 mh

Example

Error Range

r_x parameters, three values valid
for one curve

L ranges 1 mh and 10 mh

Kc cps

r_x error in %

Bild 17 und 18

L-Meßfehler durch Parallelkapazität

L-Meßfehler in %

Hz L_{ist} E_e C_{Br} C_{ges}

L_{gem}

Eigenkapazität der Spule

gesamte an den Meßklemmen liegende
Kapazität

Figs. 17 and 18

L error due to shunt capacitance

L error in %

Cps L_{true} E_c C_{bridge} C_t

L_{meas}

Inherent capacitance of coil

Total capacitance across test terminals

Bild 19

Nomogramm zum Ermitteln der Brücken-
bzw. Meßobjektspannung

Gegeben Gesucht

unten rechts

entsprechend G_x und C-Bereich den
Wert A ermitteln

Fig. 19

Nomograph for determining bridge
voltage or voltage across test item

Given Unknown

Bottom Right

Determine value A for G_x and C range

R 7400
761
Bl. 37



entsprechend C_x und f den Wert B ermitteln

die Werte A und B addieren

entsprechend dem Wert $A+B$ oben U_1/U_x ablesen

Im Beispiel

U_1 oder U_x mS

Bereiche 1...100 μF Bereich

B bzw. $A + B$ Hz

Determine value B for C_x and f

Add values A and B

Read E_1/E_x corresponding to $A+B$

Example

E_1 or E_x mmho

Ranges 1 to 100 μf Range

B or $A + B$ cps

Bild 20

C-Bereich-Reizschwelle bei 50 Hz

C-Verstimmung $|U_2| = K \cdot \frac{\Delta C_x}{C_x} \cdot U_1$

Bei $f > 50$ Hz ist K über $C'_x = \frac{f}{50} \cdot C_x$ aufzusuchen

C-Bereiche 1...100 μF

C-Bereich

Fig. 20

Sensitivity of C range at 50 cps

C unbalance $|E_2| = K \times \frac{\Delta C_x}{C_x} \times E_1$

If $f > 50$ cps, find K for $C'_x = \frac{f}{50} \times C_x$

C ranges 1 to 100 μf

C range

Bild 21

C-Gesamtfehler in den Bereichen

1 μF und 10 μF

Temperaturbereich $+10^\circ \dots +30^\circ C$

C-Fehler in %

Bereich mS

Kurve gültig für alle G-Werte

Fig. 21

Total error in C for the ranges

1 μf and 10 μf

temperature range $+10^\circ$ to $+30^\circ C$

C error in %

Range mmho

Curve valid for all G values

Bild 22 und 23

C-Gesamtfehler im Bereich

Temperaturbereich

For missing expressions see Fig. 21

Figs. 22 and 23

Total error in C for the range

temperature range

Bild 24

G_x -Meßfehler in den C-Bereichen

1...100 μF

Meßbeispiel

Bereich

C-Bereiche

G_x -Parameter gültig für jeweils eine Kurve

nS μS mS

G_x -Fehler in %

Fig. 24

Error in G_x for the C ranges

1 to 100 μf

Example

Range

C ranges

G_x parameters, four values valid for one curve

Nmho μmho mmho

G_x error in %

R 7400
761
Bl. 38



Bild 25

C-Meßfehler durch die Induktivität
der Geräteverdrahtung (für $\tan\delta \leq 0,1$)

C-Meßfehler in %

C_{ist} C_{gem}

Bild 26 und 27

Fehler der C-Dekaden

Temperaturbereich

C-Fehler in %

Leitwertdekaden abgeschaltet

Fig. 25

Error in C due to wiring inductance
(for $\tan\delta \leq 0.1$)

C error in %

C_{true} C_{meas}

Figs. 26 and 27

Error of C decades

Temperature range

C error in %

G decades switched off

R 7400
761
Bl. 39



Guarantee

Rohde & Schwarz guarantee

F O R O N E Y E A R

each instrument manufactured and sold by them to be free from defects in material and workmanship, subject to clause 5 of their terms of delivery and payment.

This guarantee does not imply the right to rescind a sale or demand a reduction in purchase price. The firm's obligation under this guarantee is limited to the repair or replacement of the defective part or parts, provided the claim is asserted in writing immediately, or within one week at the latest, after discovery of the defect. The part or parts shall be returned to the factory, with transportation charges prepaid, within one week from the instruction by the firm to do so. The return charges shall likewise be covered by the purchaser. The firm does not assume any liability for damage resulting directly or indirectly from the defect. The guarantee shall be void if the part or parts have been tampered with.

The seals of the instrument shall be undamaged. Rohde & Schwarz guarantee valves for which the purchaser has not received the certificate of guarantee of the manufacturer. Defective valves which are held to be covered by this guarantee shall be returned to the factory for examination. The following details shall be specified:

Number, date and reference of the invoice;
type and serial number (FNr.) of the instrument;
specification of valve defect.

ROHDE & SCHWARZ . MÜNCHEN 9 . TASSILOPLATZ 7

R 7400
761
Bl. 40



Beschreibung

L-C-PRÄZISIONSMESSBRÜCKE

Type LCB

BN 620

Anmerkung: Wir bitten, bei technischen Anfragen, insbesondere bei einer Anforderung von Ersatzteilen, außer der Type und Bestellnummer (BN) immer auch die Fabrikationsnummer (FNr.) des Gerätes anzugeben.

Ausgabe R 7393/761



Inhaltsübersicht

1.	<u>Eigenschaften</u>	4
1.1.	Als Selbstinduktionsmeßbrücke	4
1.2.	Als Kapazitätsmeßbrücke	5
1.3.	Als Präzisionskondensator	5
1.4.	Als Präzisionsleitwert	6
1.5.	Maße und Gewichte	7
2.	<u>Anwendung</u>	8
3.	<u>Arbeitsweise und Aufbau</u>	9
3.1.	Induktivitätsmessung	9
3.2.	Kapazitätsmessung	11
3.3.	Verwendung als Kapazitäts- und Leitwert-Normal	12
4.	<u>Inbetriebnahme und Bedienung</u>	12
4.1.	Hilfsgeräte	12
4.2.	Induktivitätsmessung	12
4.2.1.	Anschließen des Generators und Anzeigegerätes	12
4.2.2.	Anschließen des Meßobjektes	13
4.2.3.	Einstellen des Meßbereiches	13
4.2.4.	Einstellen der Meßspannung	14
4.2.4.1.	Belastbarkeit der Brücke	14
4.2.4.2.	Spannung am Meßobjekt	15
4.2.5.	Gleichstromvormagnetisierung	17
4.2.6.	Abgleich	19
4.2.7.	Meßergebnis	24
4.3.	Kapazitätsmessung	27
4.3.1.	Anschließen des Generators und Anzeigegerätes	27
4.3.2.	Anschließen des Meßobjektes	27
4.3.3.	Einstellen des Meßbereiches	27
4.3.4.	Einstellen der Meßspannung	28
4.3.4.1.	Belastbarkeit der Brücke	28
4.3.4.2.	Spannung am Meßobjekt	28
4.3.5.	Messung mit Gleichvorspannung	30
4.3.6.	Abgleich	31
4.3.7.	Meßergebnis	32
4.4.	Verwendung als Präzisionskondensator und -Leitwert	34

R 393
731
Bl. 2



5.	Schaltteilliste	36
----	---------------------------	----

	<u>Garantieverpflichtung</u>	40
--	--	----

	<u>Kurz-Bedienungsanleitung</u>	43
--	---	----

Bilder

Bild 1.	Prinzipschaltung der L-Brücke	41
Bild 2.	Prinzipschaltung der C-Brücke	41
Bild 3.	Vereinfachte Schaltung der LCB	41
Bild 4.	Gesamtschaltbild der LCB	42
Bild 5.	Frontplatte der LCB	45
Bild 6.	Maximal zulässige Brückeneingangsspannung	46
Bild 7.	Stromverhältnisse bei der Gleichstromvormagnetisierung des Meßobjektes	47
Bild 8.	Blockschaltbild für eine Gleichstromquelle zur Vormagnetisierung des Meßobjektes	48
Bild 9.	Nomogramm zur Ermittlung der Brückenausgangsspannung in den L-Bereichen 1 mH...1 H	49
Bild 10.	Nomogramm zur Ermittlung der Brückenausgangsspannung in den L-Bereichen 10 H...1000 H	50
Bild 11.	L-Fehler in den Bereichen 1 mH...10 H	51
Bild 12.	L-Fehler im Bereich 100 H	52
Bild 13.	L-Fehler im Bereich 1000 H	53
Bild 14.	r-Fehler in den Bereichen 1 mH...100 mH	54
Bild 15.	r-Fehler in den Bereichen 1 H und 10 H	55
Bild 16.	r-Fehler in den Bereichen 100 H und 1000 H	56
Bild 17.	L-Fehler durch Parallelkapazität bei 50 Hz	57
Bild 18.	L-Fehler durch Parallelkapazität bei 1 kHz	58
Bild 19.	Spannung am Meßobjekt in den C-Bereichen 1...1000 μ F	59
Bild 20.	C-Bereich-Reizschwelle bei 50 Hz	60
Bild 21.	C-Fehler in den Bereichen 1 und 10 μ F	61
Bild 22.	C-Fehler im Bereich 100 μ F	62
Bild 23.	C-Fehler im Bereich 1000 μ F	63
Bild 24.	G-Fehler in den C-Bereichen 1...100 μ F	64
Bild 25.	C-Fehler durch die Induktivität der Geräteverdrahtung	65
Bild 26.	Fehler der C-Dekaden	66
Bild 27.	Fehler der G-Dekaden	67

R 7393
761
Bl. 3



1. Eigenschaften

Frequenzbereich 50 Hz...20 kHz

Eingangsspannung max. 4 V (bei 50 Hz)
max. 30 V (bei 20 kHz)

Eingangswiderstand 10 Ω ...1 k Ω
(je nach Frequenz und Bereich)

Ausgangswiderstand 2...10 k Ω
(je nach Frequenz und Bereich)

Anschlüsse für
Brücken-Eingang und -Ausgang koaxiale 13-mm-Buchsen

1.1. Als Selbstinduktionsmeßbrücke

Der Meßwert entspricht der Ersatzschaltung einer verlustlosen Selbstinduktionsspule in Reihe mit einem reinen Wirkwiderstand.

Meßbereich

der Selbstinduktion 10 μ H...1000 H

des Widerstandes 10 m Ω ...1 M Ω

in 7 Bereichen	1 mH	1 Ω	1 H	1 k Ω
	10 mH	10 Ω	10 H	10 k Ω
	100 mH	100 Ω	100 H	100 k Ω
			1000 H	1 M Ω

Fehlergrenzen (Temperaturbereich +10°...+30° C)

der Selbstinduktion

100 μ H...10 H $\leq$ 0,5 %

10 H...1000 H $\leq$ 0,8 %

10 μ H...100 μ H $\leq$ 1,1 %

in den Bereichen 100 H und 1000 H
gelten für die Fehlergrenzen bei
 $Q < 1$ die Kurvenblätter Bild 12 u. 13

des Serienwiderstandes $\leq$ ± 3 % für $Q \leq 100$

für $Q > 100$ siehe Kurvenblätter
Bild 14...16

Den Meßklemmen parallel-
liegende Schalkkapazität etwa 10 pF

Induktivität in Serie
zum Meßobjekt etwa 0,08 μ H

Gleichstrom-Vormagnetisierung ist möglich

7393
51
L. 4



1.2. Als Kapazitätsmeßbrücke

Der Meßwert entspricht der Ersatzschaltung einer verlustlosen Kapazität mit parallelgeschaltetem Wirkleitwert.

Meßbereich

der Kapazität	10 nF...1000 µF		
des Leitwertes	10 µS...1 S		
in 4 Bereichen	1 µF 1 mS	100 µF 100 mS	
	10 µF 10 mS	1000 µF 1 S	

Fehlergrenzen (Temperaturbereich +10°...+30° C)

der Kapazität

100 nF...10 µF	$\leq \pm 0,5 \%$
10 µF...1000 µF	$\leq \pm 0,7 \%$
10 nF...100 nF	$\leq \pm 1,1 \%$

für Meßobjekte mit $\tan \delta > 1$ sind in den Bereichen 10 µF...1000 µF die Fehlergrenzen aus den Kurvenblättern Bild 21...23 entnehmbar

des Wirkleitwertes $\leq \pm 3 \%$ für $\tan \delta \geq 10^{-2}$
für $\tan \delta < 10^{-2}$ siehe Kurvenblatt Bild 24

Induktivität in Serie zum

Meßobjekt etwa 0,08 µH

Der zu messende Kondensator kann eine Gleichvorspannung erhalten. Zulässige Spannungswerte siehe unter 4.3.5., Bl. 30.

1.3. Als Präzisionskondensator

Bereich	100 pF...1 µF
einstellbar in 4 Dekaden	12 x 100 pF
	10 x 1 nF
	10 x 10 nF
	10 x 100 nF

Fehlergrenzen (Temperaturbereich +10°...+30° C)

Dekaden 10 x 100 nF und 10 x 10 nF . $\leq \pm 0,3 \%$

Dekade 10 x 1 nF allein $\leq \pm 0,3 \%$

Dekade 10 x 1 nF zusammen mit

Dekade 12 x 100 pF $\leq \pm 1 \%$

Dekade 12 x 100 pF $\leq \pm 1 \%$

Beim Parallelschalten der Leitwertdekaden kommt eine Kapazitätsunsicherheit von $\leq \pm 30 \text{ pF}$ hinzu.



Für den Temperaturbereich +15...+25° C sind die Toleranzen mit dem Faktor 0,7 zu multiplizieren.

Serieninduktivität zum Kondensator $\leq 0,45 \mu\text{H}$

Verlustfaktor

Dekaden 10 x 1 nF bis 10 x 100 nF $\tan\delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$ (Polystyrol)

Dekade 12 x 100 pF $\tan\delta \approx 10^{-3}$ (Keramik)

Zusätzlich ist ein durch die Verdrahtung usw. bedingter Reihenwiderstand von max. 20 mΩ zu berücksichtigen.

Max. Spannungsbelastung $50 V_{\text{eff}}$

1.4. Als Präzisionsleitwert

Bereich $0,1 \mu\text{S} \dots 1 \text{ mS}$

einstellbar in 4 Dekaden

11 x 0,1 μS
11 x 1 μS
11 x 10 μS
11 x 100 μS

Fehlergrenzen (und Belastbarkeit)

Dekade 11 x 100 μS allein $\leq \pm 0,3 \%$ (3 W)
zusammen mit den übrigen Dekaden
 $\leq \pm 0,7 \%$

Dekade 11 x 10 μS allein $\leq \pm 1,2 \%$ (0,5 W)
zusammen mit den kleineren G-Werten
 $\leq \pm 1,5 \%$

Dekade 11 x 1 μS allein $\leq \pm 1,7 \%$ (0,25 W)
zusammen mit der Dekade 11 x 0,1 μS
 $\leq \pm 2,8 \%$

Dekade 11 x 0,1 μS $\leq \pm 5,5 \%$ (0,1 W)

Obige Werte gelten für einen Temperaturbereich von +10° bis +30° C; für den Bereich +15° bis +25° C sind die Toleranzen mit dem Faktor 0,7 zu multiplizieren.

Kondensator und Leitwert sind parallelgeschaltet, so daß in den angegebenen Bereichen sämtliche kapazitiven Scheinwiderstände nachgebildet werden können.



1.5. Sonstige Daten

Abmessungen 470 x 275 x 260 mm
(R&S-Normkasten Größe 46)

Gewicht 12 kg

7395
51
L. 7



2. Anwendung

Die Selbstinduktion z.B. einer Drosselspule oder eines Übertragers schnell und genau zu messen ist eine Aufgabe, bei der man oft auch in gut ausgestatteten Labors auf Schwierigkeiten stößt. Meist mußten bei einer dieser beiden Forderungen Zugeständnisse gemacht werden. Hohe Meßgenauigkeit und leichte Bedienbarkeit zu erreichen (gleichbedeutend mit Schnelligkeit und Sicherheit bei der Messung), war die Hauptaufgabe bei der Entwicklung dieser Meßbrücke.

Die L-C-Präzisionsmeßbrücke Type LCB ist in erster Linie eine Selbstinduktionsmeßbrücke. Eine ihrer Besonderheiten ist der weit nach oben (1000 Henry) ausgedehnte L-Meßbereich, so daß auch außergewöhnliche Meßaufgaben gelöst werden können. Der Meßgegenstand wird als Reihenschaltung einer verlustlosen Selbstinduktion mit einem reinen Wirkwiderstand gemessen. Nach Abgleich der Brücke sind der Wert der Selbstinduktion und der Wert des Widerstandes für sich unmittelbar ablesbar. Hieraus ist schon zu ersehen, daß es nicht nur möglich ist, verlustbehaftete Induktivitäten zu messen, sondern ebenso Widerstände mit induktiver Komponente. Wenn nötig, kann der Meßgegenstand während der Messung mit Gleichstrom belastet werden. Das ist erwünscht, wenn es sich um die Messung eines Übertragers handelt, der betriebsmäßig mit Gleichstrom-Vormagnetisierung arbeiten soll. Mit der L-Messung sind die Möglichkeiten dieser Brücke nicht erschöpft. Sie arbeitet nach einfacher Umschaltung auch als Kapazitätsmeßbrücke. Ähnlich wie bei der L-Messung ist auch hier Wert darauf gelegt worden, den Meßbereich nach oben reichlich zu bemessen. Blind- und Wirkkomponente werden wie bei der L-Messung getrennt angezeigt.

Um die in dieser Präzisionsmeßbrücke verwendeten wertvollen Einzelteile möglichst günstig auszunützen, ist der Hauptteil der eingebauten Kondensatoren und Widerstände durch eine Schalterstellung von außen zugänglich gemacht. Damit steht zusätzlich ein einstellbarer Kondensator und ein Leitwert zur Verfügung. Die aufgezeigte Vielzahl der Schaltmöglichkeiten ist nur gerechtfertigt, wenn gleichzeitig die Bedienung so einfach und sinnfällig gemacht ist, daß Irrtümer und Fehlmessungen ausgeschaltet sind. Dies ist durch zweckmäßige Gestaltung der Bedienungseinrichtung (selbsttätig springendes Komma) erreicht. Die Meßergebnisse bzw. die eingestellten Werte sind unmittelbar als Zahl ablesbar, wenn die Brücke als Kondensator oder Leitwert benutzt wird. Es brauchen also weder Rechnungen vorgenommen noch irgendwelche Hilfsmittel zur Auswertung benützt werden.

R 7393
761
Bl. 8



2. Anwendung

Die Selbstinduktion z.B. einer Drosselspule oder eines Übertragers schnell und genau zu messen ist eine Aufgabe, bei der man oft auch in gut ausgestatteten Labors auf Schwierigkeiten stößt. Meist mußten bei einer dieser beiden Forderungen Zugeständnisse gemacht werden. Hohe Meßgenauigkeit und leichte Bedienbarkeit zu erreichen (gleichbedeutend mit Schnelligkeit und Sicherheit bei der Messung), war die Hauptaufgabe bei der Entwicklung dieser Meßbrücke.

Die L-C-Präzisionsmeßbrücke Type LCB ist in erster Linie eine Selbstinduktionsmeßbrücke. Eine ihrer Besonderheiten ist der weit nach oben (1000 Henry) ausgedehnte L-Meßbereich, so daß auch außergewöhnliche Meßaufgaben gelöst werden können. Der Meßgegenstand wird als Reihenschaltung einer verlustlosen Selbstinduktion mit einem reinen Wirkwiderstand gemessen. Nach Abgleich der Brücke sind der Wert der Selbstinduktion und der Wert des Widerstandes für sich unmittelbar ablesbar. Hieraus ist schon zu ersehen, daß es nicht nur möglich ist, verlustbehaftete Induktivitäten zu messen, sondern ebenso Widerstände mit induktiver Komponente. Wenn nötig, kann der Meßgegenstand während der Messung mit Gleichstrom belastet werden. Das ist erwünscht, wenn es sich um die Messung eines Übertragers handelt, der betriebsmäßig mit Gleichstrom-Vormagnetisierung arbeiten soll. Mit der L-Messung sind die Möglichkeiten dieser Brücke nicht erschöpft. Sie arbeitet nach einfacher Umschaltung auch als Kapazitätsmeßbrücke. Ähnlich wie bei der L-Messung ist auch hier Wert darauf gelegt worden, den Meßbereich nach oben reichlich zu bemessen. Blind- und Wirkkomponente werden wie bei der L-Messung getrennt angezeigt.

Um die in dieser Präzisionsmeßbrücke verwendeten wertvollen Einzelteile möglichst günstig auszunützen, ist der Hauptteil der eingebauten Kondensatoren und Widerstände durch eine Schalterstellung von außen zugänglich gemacht. Damit steht zusätzlich ein einstellbarer Kondensator und ein Leitwert zur Verfügung. Die aufgezeigte Vielzahl der Schaltmöglichkeiten ist nur gerechtfertigt, wenn gleichzeitig die Bedienung so einfach und sinnfällig gemacht ist, daß Irrtümer und Fehlmessungen ausgeschaltet sind. Dies ist durch zweckmäßige Gestaltung der Bedienungseinrichtung (selbsttätig springendes Komma) erreicht. Die Meßergebnisse bzw. die eingestellten Werte sind unmittelbar als Zahl ablesbar, wenn die Brücke als Kondensator oder Leitwert benutzt wird. Es brauchen also weder Rechnungen vorgenommen noch irgendwelche Hilfsmittel zur Auswertung benützt werden.

E 7393
751
Bl. 8



3. Arbeitsweise und Aufbau

3.1. Induktivitätsmessung

Die LCB arbeitet bei der L-Messung als Maxwell-Brücke nach Bild 1. Die beiden gegenüberliegenden Zweige 1-2 und 3-0 werden durch die Festwiderstände R_1 und R_2 gebildet. Im Zweig 2-3 liegen die veränderbaren Meßnormalien, und zwar die Kapazitätsdekaden C_N und parallel dazu die Leitwertdekaden G_N . Das Meßobjekt wird als Serienschaltung einer Induktivität L_x und eines Verlustwiderstandes r_x gemessen. Die Abgleichbedingungen der Brücke lauten:

$$L_x = R_1 \cdot R_2 \cdot C_N \quad (1)$$

$$r_x = R_1 \cdot R_2 \cdot G_N \quad (2)$$

Bild 3 zeigt die vereinfachte Schaltung, Bild 4 den Gesamt-Stromlauf. Die Eingangsspannung gelangt von der Buchse (1) (siehe Bild 5) über den Übertrager Tr1 an die Brückeneckpunkte 2-0. Der Übertrager hat ein Übersetzungsverhältnis von $u_1 = 1,1$; seine Primärwicklung ist abgeschirmt. Die Brückenwiderstände R_1 und R_2 , auch Verhältniswiderstände genannt, bestehen aus bifilar gewickelten Drahtwiderständen, deren Widerstandstoleranz $\leq \pm 0,05 \%$ ist. Beim Betätigen des Bereichsschalters S1 (12 in Bild 5) werden automatisch die richtigen Werte eingestellt. Ein im Fenster (11) sichtbarer Zeiger gibt den eingestellten Bereich an. „ R_1 “ wird auf der Ebene VI, „ R_2 “ auf der Ebene V des Stufenschalters S1 geschaltet. In einigen L-Bereichen sind die Verhältniswiderstände mit Spulen und Kondensatoren kombiniert. Diese dienen zur Kompensation der unvermeidlichen Phasenfehler der Widerstände, um die Genauigkeit der Brücke zu erhöhen.

Der Stufenkondensator C_N wird mit den Schaltern S2...S5 betätigt (7 bis 10 in Bild 5), und zwar schalten S2 11 x 0,1 μ F, S3 11 x 10 nF, S4 11 x 1 nF und S5 12 x 100 pF. Mit Ausnahme der Dekade 12 x 100 pF haben alle Kondensatoren Styroflex als Dielektrikum, dessen Verlustfaktor $\tan \delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$ beträgt, und sind auf $\pm 0,1 \%$ abgeglichen. Die letzte Dekade besteht aus Keramikkondensatoren mit einem Verlustfaktor von $\tan \delta \approx 10^{-3}$ und einer Abgleichgenauigkeit von $\pm 0,1 \%$. Da bei niedrigen C-Werten die Kapazität der Verdrahtung nicht vernachlässigt werden darf, ist sie mit eingeeicht worden. Wegen dieser Kapazität gibt es bei der LCB auch keinen Wert 0 pF, sondern der kleinste einstellbare C_N -Wert beträgt 100 pF.

D 7393
761
Bl. 9



Um dem Benutzer der LCB die Rechenoperation (1) zu ersparen, wird zugleich mit dem Bereichsschalter S1 die Maßeinheit für die Induktivitäten umgeschaltet (μH , mH , H , Fenster (6) in Bild 5) und ein weißer Punkt (5) zwischen den Ziffernfenstern (4) verschoben, der die Kommastelle angibt.

Der Stufenleitwert G_N wird mit S6...S9 geschaltet: S6 $11 \times 0,1 \text{ mS}$, S7 $11 \times 10 \text{ }\mu\text{S}$, S8 $11 \times 1 \text{ }\mu\text{S}$, S9 $11 \times 0,1 \text{ }\mu\text{S}$. Wie bei der L-Ablesung bewirkt der Bereichsschalter S1, daß über den Drehknöpfen (16) bis (19) der richtige Zahlenwert für r_x , dazu der weiße Punkt (14) für die Komma-stelle und im Fenster (15) die richtige Einheit $\text{m}\Omega$, Ω oder $\text{k}\Omega$ erscheinen. Dadurch wird die Ausrechnung der Gleichung (2) erspart. Die Leitwerte der Dekade $11 \times 0,1 \text{ mS}$ sind aus bifilar gewickelten Drahtwiderständen hergestellt und auf 0,05 % abgeglichen. Die übrigen Leitwerte bestehen aus Schichtwiderständen mit 0,5 %, 1 % und 2 % Toleranz.

Das Meßobjekt wird an die mit „X“ bezeichneten Klemmen (20) angeschlossen. Eine Klemme ist mit dem Massezeichen versehen und unmittelbar mit dem Gehäuse der LCB verbunden. Bei der Messung von Induktivitäten ist der Schalterkontakt S1I geschlossen. Die Masse liegt dadurch zugleich am Verhältniswiderstand „ R_2 “ (Brückenzweig 3-0 in Bild 1).

Zwischen den Punkten 1-3 tritt die Ausgangsspannung auf. Sie wird über den Übertrager Tr2 ausgekoppelt (S1II-IV geschlossen). Primär- und Sekundärwicklung sind sorgfältig gegeneinander geschirmt, um zu verhindern, daß eine Spannung auf kapazitivem Wege auf den Empfänger gelangt. Ein solcher kapazitiver Durchgriff würde eine Verstimmung der Brücke vortäuschen und ein falsches Meßergebnis liefern. Ferner ist der Über-trager so aufgebaut, daß seine Kapazitäten an definierten Punkten liegen und frequenzunabhängig bleiben. Sein Übersetzungsverhältnis, von den Punkten 1-3 zur Ausgangsbuchse gerechnet, beträgt $u_2 = 2,16$.

Zwischen Tr2 und Ausgangsbuchse (3) ist ein R-C-Glied geschaltet, das den Ausgangsscheinwiderstand über den gesamten Frequenzbereich konstant hält.

In der Zuleitung der Wechselspannung zur eigentlichen Brücke befindet sich hinter dem Übertrager Tr1 das normalerweise miteinander verbundene Buchsen-paar (2). In diese Buchsen kann im Bedarfsfall ein Gleichstrom zur Vor-magnetisierung des Spulenkernes eingespeist werden, wie in Bild 3 darge-stellt. Die Gleichspannungsquelle muß mit einem Kondensator überbrückt werden, damit ihr Innenwiderstand den Wechselstrom nicht schwächt.



Der eingespeiste Gleichstrom verzweigt sich am Brückenpunkt O über die Reihenschaltungen (Meßobjekt + R₁) und (R₂ + C_N || G_N). Um eine weitere Verzweigung über den Übertrager Tr2 zu verhindern, ist zwischen S1II und Tr2 der Kondensator C3 geschaltet. Über die L-Messungen bei Vormagnetisierung siehe Abschnitt 4.2.5., Bl. 17.

3.2. Kapazitätsmessung

Zur C-Messung wird die LCB gemäß Bild 2 als Wheatstone-Brücke geschaltet. Die Zweige 1-2 und 2-3 bestehen aus Festwiderständen; die veränderbaren Normalien liegen im Zweig 3-0. Die Abgleichbedingungen lauten:

$$C_x = C_N \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

$$G_x = G_N \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

Die Verhältniswiderstände R₁ und R₂, bifilar gewickelte Präzisionswiderstände, werden wie im L-Bereich auf den Ebenen VI und V des Schalters S1 umgeschaltet. S1I trennt die Verbindung zwischen der X-Masse-Klemme und „R₂“ auf; S1III legt die Masse nun an die Normalien C_N und G_N. Im Fenster (11) erscheint der eingestellte Meßbereich, (6) zeigt die Einheit nF oder µF an, und zwischen den Zahlenfenstern (4) gibt der weiße Punkt (5) die Kommastelle an, so daß Rechnungen nach Gleichung (3) und (4) nicht erforderlich sind. Die Normalien C_N und G_N sind die gleichen wie bei der L-Messung. Alle eingestellten Werte erscheinen in den Fenstern (4) und (13).

Das Meßobjekt wird an die Klemmen (20) angeschlossen; eine Klemme ist unmittelbar mit dem Gehäuse der LCB verbunden.

Die Auskopplung der Brückenspannung erfolgt über die gleichen Elemente wie im L-Bereich. Über die Klemmen (2) kann der zu messende Kondensator auch eine Gleichspannung erhalten. Es sind jedoch besondere Vorsichtsmaßnahmen erforderlich, um Beschädigungen der Brücke durch Überlastung zu vermeiden. Hierauf wird im Abschnitt 4.3.5. näher eingegangen.

7-93
61
1. 11



3.3. Verwendung als Kapazitäts- und Leitwert-Normal

Wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, können die Normalien C_N und G_N auch getrennt von der Brückenschaltung verwendet werden. Der Schalter S1VI legt die Parallelschaltung C_N und G_N an die X-Klemmen. S1III und IV trennen die übrige Schaltung ab. Eine Klemme bleibt mit dem Gehäuse verbunden. Einstellbar sind die Werte $C_N = 0,1 \text{ nF} \dots 1,1112 \text{ } \mu\text{F}$ und $G_N = 0,1 \text{ } \mu\text{S}$ bis $1,1111 \text{ mS}$. Sie können in den schon erwähnten Fenstern abgelesen werden.

4. Inbetriebnahme und Bedienung

Zur Einarbeitung lese man folgende Beschreibung. Nach einiger Meßerfahrung genügt dann die Kurz-Bedienungsanleitung von Bl.43 und Bl.44 (vor dem Bild 5).

4.1. Hilfsgeräte

Zum Betrieb der Brücke benötigt man einen geeigneten Generator und ein selektives Anzeigegerät. Wir empfehlen unseren RC-Generator Type SRM (30 Hz...300 kHz) und unseren Abstimmbaren Anzeigeverstärker Type UBM. Zur Messung der Spannung am Meßobjekt empfehlen wir unser NF-Millivoltmeter Type UVN (BN 12001) mit 1 M Ω Eingangswiderstand.

4.2. Induktivitätsmessung

4.2.1. Anschließen des Generators und Anzeigegerätes

Die Meßbrücke LCB wird mit dem Generator und dem Anzeigegerät über koaxiale Kabel verbunden, die mit 13-mm-Steckern FS 413/11 versehen sind. Um die Kopplungswiderstände möglichst klein zu halten, muß besonders auf guten Kontakt des Außenleiters geachtet werden. Anderenfalls können Störspannungen auf das Anzeigegerät gelangen, die den Nullabgleich stören oder fälschen. Da sowohl Generator als auch Anzeigegerät mit Schuko-Netzsteckern ausgerüstet sind, muß man besonders bei solchen Meßfrequenzen, die im Bereich der Netzfrequenz liegen, dafür sorgen, daß keine sogenannte Brummschleife entsteht. Eine solche ist z.B. dann gegeben, wenn die Netzstecker von Generator und Anzeigegerät in auseinanderliegenden Schukodosen stecken und durch den Nulleiter, der gleichzeitig Schutzleiter ist, ein Strom fließt. Am einfachsten wird eine solche Brummschleife unterbunden, wenn beide Netzstecker in möglichst benachbarte Steckdosen (am besten in eine Doppel-Schukodose) eingesteckt werden.

R 7393
761
Bl. 12



Einige Zeit nach dem Einschalten wird der Generator auf die gewünschte Meßfrequenz eingestellt. Über die Höhe der Meßspannung siehe Abschnitt 4.2.4.. Sodann ist das Anzeigegerät auf die Meßfrequenz abzustimmen. Bei Verwendung unseres Abstimmbaren Anzeigeverstärkers UBM sollte man auf jeden Fall von der Möglichkeit Gebrauch machen, größte Empfindlichkeit und Selektion durch eine kräftige Rückkopplung bis kurz vor dem Schwingungseinsatz einzustellen (siehe UBM-Beschreibung).

Sollte in Ausnahmefällen kein selektiver Anzeigeverstärker zur Verfügung stehen, dann kann man auch ein breitbandiges Röhrenvoltmeter benutzen. Allerdings muß zwischen Meßsender und Brückeneingang ein Tiefpaß oder Bandpaß zur Unterdrückung der Generator-Oberwellen eingeschaltet werden. Dieses ist jedoch unwirksam, wenn das Meßobjekt magnetisch so stark belastet wird, daß es selbst Oberwellen verursacht. Allgemein möchten wir deshalb von der Verwendung breitbandiger Anzeigegeräte abraten.

4.2.2. Anschließen des Meßobjektes

Das Meßobjekt wird an die in Bild 5 mit (20) bezeichneten Klemmen angeschlossen. Das geerdete oder im Betrieb an Erde liegende Spulenende ist mit der linken Klemme (mit einem Massezeichen gekennzeichnet) zu verbinden.

4.2.3. Einstellen des Meßbereiches

Der Meßbereich wird mit dem Drehknopf (12) (siehe Bild 5) eingestellt und durch den Zeiger (11) angezeigt. Ist die zu erwartende Größe der Selbstinduktion nicht bekannt, so stelle man auf einen mittleren Bereich ein. Beim Abgleich merkt man dann sehr bald, ob er richtig gewählt war oder ob auf einen anderen umgeschaltet werden muß. Um die Genauigkeit der Brücke ausnutzen zu können, sollte stets der kleinstmögliche Meßbereich gewählt werden.

7393
C1
1. 13



4.2.4. Einstellen der Meßspannung

Die Höhe der Brückeneingangsspannung wird nach oben begrenzt durch

- die magnetische Belastbarkeit des Eingangsübertragers,
- die Belastbarkeit der Brückenwiderstände,
- die magnetische Belastbarkeit des Meßobjektes,

nach unten durch die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes.

4.2.4.1. Belastbarkeit der Brücke

Unter Berücksichtigung der Belastbarkeit von Eingangsübertrager und Brückenwiderständen ergeben sich die Spannungswerte, die in Bild 6 über der Frequenz aufgetragen sind. Diese Angaben gelten, wenn die zu messende Spule keine Gleichfeldvormagnetisierung erhält. Ist dies der Fall, so muß Abschnitt 4.2.5. berücksichtigt werden. Wechsel- und Gleichstrombelastung des Brückenwiderstandes „ R_1 “ dürfen zusammen nicht mehr als 10 W ausmachen. Diese Forderung wird bei der Messung der reversiblen Permeabilität μ_{rev} wahrscheinlich von selbst erfüllt sein, da die Wechselfeldamplitude $\mathcal{H}_{max}$ klein gegen das Gleichfeld H_{max} sein soll, so daß nur der Gleichstrom den Widerstand belastet.

Muß jedoch mit großer Wechselfeldstärke gemessen werden, so läßt sich die Belastung des Widerstandes „ R_1 “ wie folgt berechnen:

$$P_{j\sim} = 1,2 \cdot U_1^2 \cdot R_1 \left(\frac{R_1 + r_x}{(R_1 + r_x)^2 + (\omega L_x)^2} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_{j=} = I_x^2 \cdot R_1 \quad (6)$$

U_1 = Brückeneingangsspannung

I_x = Gleichstrom durch das Meßobjekt

(5) und (6) zusammen dürfen nicht mehr als 10 W ergeben. Da die in R_1 umgesetzte Leistung wegen der Übertragerverluste stets etwas kleiner als 10 W sein wird, ist die Gefahr einer Beschädigung der Brücke so gut wie ausgeschlossen.

7393
7.1
31. 14



4.24.2. Spannung am Meßobjekt

Bei Luftspulen und solchen Induktivitäten, bei denen der Kraftfluß zum großen Teil in Luft verläuft (z.B. Stift- und Schraubkerne), wird die Höhe der Spannung am Meßobjekt meistens keine Rolle spielen.

Hochpermeable Kerne mit ganz oder fast geschlossenem magnetischem Kreis müssen dagegen bei einer definierten Feldstärke gemessen werden, um reproduzierbare Werte zu erhalten.

Die Feldstärke in einem magnetisch geschlossenen Kreis ergibt sich allgemein zu

$$H_{\max} = 0,4 \cdot \pi \cdot I_{\max} \cdot n/l \quad [\text{Oe}] \quad (7)$$

$$H_{\max} = I_{\max} \cdot n/l \quad [\text{AW}] \quad (8)$$

$I_{\max}$ = Scheitelwert des Wechselstromes

n = Windungszahl

l = Länge des Kraftlinienweges in cm

Wenn der Kern einen Luftspalt und eventuell verschiedene Querschnitte hat, ist die Feldstärke natürlich an den einzelnen Stellen des Kraftflußweges nicht gleich, doch ist die Kenntnis der Einzelfeldstärken im allgemeinen nicht erforderlich. Man begnügt sich bei den Messungen mit der Kenntnis der Gesamtfeldstärke, wobei in die Gleichungen (7) und (8) für l der gesamte Kraftlinienweg einschließlich Luftspalt einzusetzen ist.

Ist die Stromstärke $I_{\max}$ nicht bekannt, sondern nur die Spannung $U_{\max}$, so nehmen die Gleichungen (7) und (8) die Form

$$H_{\max} = 0,4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{\max}}{\sqrt{(\omega L_x)^2 + r_x^2}} \cdot \frac{n}{l} \quad [\text{Oe}] \quad (9)$$

und

$$H_{\max} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{(\omega L_x)^2 + r_x^2}} \cdot \frac{n}{l} \quad [\text{AW}] \quad (10)$$

an. r_x^2 wird man bei der Berechnung häufig vernachlässigen können.

Den Spulenstrom $I_{\max}$ kann man messen, indem in Reihe zum Meßobjekt ein genau bekannter Schichtwiderstand R geschaltet und der Spannungsabfall U_{eff} daran gemessen wird. Den Strom $I_{\max}$ erhält man dann zu

$$I_{\max} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} \cdot \sqrt{2} \quad [\text{V}] \quad (11)$$



Der Widerstand R , dessen Wert klein gegen den Scheinwiderstand des Meßobjektes bei der Meßfrequenz sein soll, z.B. $1\ \Omega$ oder $10\ \Omega$, braucht bei der Messung nicht kurzgeschlossen zu werden. Der abgelesene Zahlenwert r_x' wird einfach um R vermindert: $r_x = r_x' - R$.

Die Spannung U_{eff} muß mit einem empfindlichen Röhrenvoltmeter gemessen werden, da I_{max} sehr gering sein kann. Damit das Voltmeter richtig arbeitet, ist der Widerstand R an die mit Masse verbundene Meßobjektklemme anzuschließen, an der auch der geerdete Pol des Voltmeters liegen muß.

Im L-Bereich $1\ \text{mH}$ ist der größte abgleichbare r_x -Wert $1,1111\ \Omega$. Da man Vorwiderstände unter $1\ \Omega$ nicht nehmen wird, kann das geschilderte Verfahren hier nur selten angewendet werden. Man muß dann die Spannung U_x unmittelbar am Meßobjekt messen.

Wenn das Voltmeter hochohmig gegen den zu messenden Spulenscheinwiderstand ist, der im Bereich $1\ \text{mH}$ höchstens etwa $130\ \Omega$ erreichen kann, muß es während der Messung nicht unbedingt abgeschaltet werden. Damit die Meßschaltung jedoch nicht handempfindlich wird, sollte eine kurze abgeschirmte Leitung verwendet werden, wenn man es nicht überhaupt vorzieht, den Spannungsmesser nach dem Einstellen der Spannung abzuschalten. Nach dem Abgleich der Brücke sollte die Spannung allerdings nochmals kontrolliert werden.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß die Strom- und Spannungsmessungen nur richtig sein können, wenn die Kurvenform von Strom und Spannung sinusförmig ist. Sollten Spulen mit so großem Magnetisierungsstrom gemessen werden, daß nennenswerte Verzerrungen auftreten, so ist mit einem selektiven Voltmeter zu messen, das nur die Grundwelle anzeigt. Hierfür kann z.B. unser Tonfrequenz-Analysator Type FTA Verwendung finden.

Werden Spulen bei sehr kleiner Feldstärke gemessen, so kann es sein, daß die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes nicht ausreicht, um zu einem einwandfreien Abgleich der Brücke zu gelangen. Damit der Benutzer der LCB die Möglichkeit hat, auch in solchen Fällen die Spannungsverhältnisse abzuschätzen, sind Nomogramme zur Ermittlung der Brückenausgangsspannung berechnet, deren Anwendung im Abschnitt 4.2.6. erläutert wird.

R 7393
761
Bl. 16



4.2.5. Gleichstromvormagnetisierung

Die LCB gestattet auch die Messung der Induktivität bei gleichzeitiger Vormagnetisierung durch einen Gleichstrom, der in das Klemmenpaar (2) (Bild 5) eingespeist werden kann. Die Schaltung für die Gleichstromquelle ist in Bild 3 dargestellt und wurde in Abschnitt 3.1. kurz erläutert.

Der Gleichstrom, dessen Größe sich aus der gewünschten Gleichfeld-Vormagnetisierung zu

$$I = \frac{H_{00} \cdot l}{0,4 \cdot \pi \cdot n} \quad (12)$$

bzw.

$$I = \frac{H_{AV} \cdot l}{n} \quad (13)$$

errechnet, wird mit dem Strommesser „I“ gemessen. Da sich der Strom in der Brücke auch über $(R_2 + 1/G_H)$ verzweigt, ist die von „I“ angezeigte Stromstärke nicht in allen Fällen gleich der im Meßobjekt. Das Verhältnis des eingespeisten Stromes I_{ges} zum Strom durch das Meßobjekt läßt sich berechnen zu

$$\frac{I_{ges}}{I_x} = \gamma = \frac{\alpha (R_1 + R_-)}{R_1 + \beta \cdot R_-} + 1 \quad (14)$$

α = Brückenverhältnis in dem Betriebsmeßbereich (Tabelle 1, Blatt 18)

β = Verhältnis des Wechselstromwiderstandes r_x zum Gleichstromwiderstand R_- der zu messenden Spule: $\beta = r_x / R_-$

R_1 = Brückenwiderstand „ R_1 “ in dem betreffenden Meßbereich

In Bild 7 ist der Zusammenhang (14) grafisch dargestellt. Parameter ist β .

$\gamma = I_{ges} / I_x$ ist über dem gemessenen oder zu erwartenden Wirkwiderstandswert r_x aufgetragen.

Den erforderlichen Speisestrom an den Klemmen (2) findet man dann zu

$$I_{ges} = I_x \cdot \gamma \quad (15)$$

Der Spulengleichstrom läßt sich selbstverständlich auch durch einen Strommesser bestimmen, der unmittelbar in Reihe zum Meßobjekt geschaltet wird. Er muß jedoch mit einem Kondensator überbrückt werden, dessen

R 7393
761
Bl. 17



Tabelle 1

Bereich	R_1	Brücken- verhältnis α
		R_1/R_2
1 mH	10 Ω	10^3
10 mH	31,62 Ω	10^4
100 mH	100 Ω	10^5
1 H	316,2 Ω	10^6
10 H	1 k Ω	10^7
100 H	10 k Ω	10^8
1000 H	31,62 k Ω	10^9
		R_2/R_1
1 μ F	100 Ω	1
10 μ F	100 Ω	10^1
100 μ F	100 Ω	10^2
1000 μ F	10 Ω	10^3

Tabelle 2

Bereich	$U_{\max}$	$I_{\max}$
1 mH	150 V	1,00 A
10 mH	190 V	0,50 A
100 mH	190 V	0,30 A
1 H	225 V	0,15 A
10 H	250 V	0,10 A
100 H	250 V	0,03 A
1000 H	250 V	0,01 A

Scheinwiderstand gegen den der Spule vernachlässigbar ist. Da man den Strommesser „I“ auf der Speiseseite (Klemmen (2)) trotzdem nicht entbehren kann, damit eine Überlastung der Brückenwiderstände vermieden wird, sollte man im allgemeinen das erste Meßverfahren vorziehen. In Tabelle 2 sind die an den Klemmen (2) zulässigen Spannungen und Ströme zusammengestellt. Sie sind für eine maximale Belastung der Brückenelemente von 10 W berechnet. Strom und Spannung müssen zugleich überwacht werden, da keiner der beiden Werte überschritten werden darf.

Tabelle 3

Bereich	Maximale EMK (Leerlaufspannung)	R_1 (Innenwiderstand)	Max. Belastung von R_1
1 mH	20 V	10 Ω	1 A
10/100 mH	60 V	100 Ω	0,6 A
1/10 H	200 V	1 k Ω	0,2 A
100/1000 H	340 V	10 k Ω	35 mA



Hat man häufiger Messungen bei Gleichstrom-Vormagnetisierung durchzuführen, dann empfiehlt sich die Anfertigung eines Netzgerätes, dessen Leerlaufspannung und Innenwiderstand so bemessen sind, daß auch bei versehentlich falscher Einstellung keine Beschädigung auftreten kann. Ein solches Gerät, dessen Blockschaltung Bild 8 zeigt und dessen Daten in Tabelle 3 aufgeführt sind, wird mit vier Bereichen ausgerüstet, die entsprechend dem Induktivitätsmeßbereich eingestellt werden.

Zur Einstellung der Stromstärke wird zweckmäßigerweise die EMK verändert, was z.B. durch einen Regeltransformator auf der Wechselstromseite des Netzgerätes erfolgen kann.

Bei aller Vorsicht mit der Gleichstrombelastung sollte aber nicht vergessen werden, daß auch durch die Wechselstromleistung der Brückenwiderstand „ R_1 “ erwärmt wird. Gleich- und Wechselstromleistung zusammen dürfen, wie im Abschnitt 4.2.4.1. erwähnt, nicht mehr als 10 W ausmachen.

4.2.6. Abgleich

Wenn die Brückenspannung richtig eingestellt ist, regelt man die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes so ein, daß der Zeiger etwa im zweiten Viertel der Skala steht. Nun wird durch abwechselndes Verstellen der L_x -Dekaden mit den Knöpfen (7) bis (10) und der r_x -Dekaden mit den Knöpfen (16) bis (19) der Zeigerausschlag zum Verschwinden gebracht. Kurz bevor der Ausschlag zu Null wird, ist die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes zu erhöhen, bis der Zeiger wieder im zweiten Viertel steht.

Je nach der Empfindlichkeit des Indikators wird man schließlich zu einer Abgleichstellung gelangen, bei der entweder der Zeigerausschlag ganz zu Null wird oder eine nicht mehr abgleichbare Restspannung verbleibt.

Beim Zeigerausschlag Null prüfe man, ob durch Verstellen der kleinsten L_x - und r_x -Stufen um einen Schritt wieder ein Ausschlag sichtbar wird. Ist dies nicht der Fall, so ist die Empfindlichkeit des Indikators zu gering. Man kann in diesem Fall die Genauigkeit der Brücke nicht ausnutzen, weil die letzten Dekaden zum Meßergebnis nichts beitragen. Durch Verwendung eines empfindlicheren Gerätes, Hintereinanderschalten zweier Empfänger oder, wenn möglich, auch durch Erhöhen der Brückeneingangsspannung bemühe man sich, wieder zu einer Anzeige der Brückenausgangsspannung zu gelangen.

E 7593
761
Bl. 19



Eine nicht abgleichbare Restspannung am Ausgang der Brücke kann mehrere Ursachen haben:

Eine Störspannung,

Die Stufenzahl für den L_x -Abgleich ist zu gering,

Die Stufenzahl für den r_x -Abgleich ist zu gering.

Zur Prüfung, ob eine Störspannung der Grund für die nicht abgleichbare Brückenspannung ist, ziehe man aus der Ausgangsbuchse des Meßsenders den Leitungsstecker heraus, verbinde jedoch den Außenleiter mit dem Sendergehäuse, so daß also nur der Mittelleiter unterbrochen ist. Der Zeigerausschlag muß nun verschwinden. Wenn nicht, ist anzunehmen, daß eine Störspannung eingekoppelt wird, z.B. durch eine Erdschleife über die Schukodosen oder durch einen schlechten Kontakt in einem Koaxialstecker der Verbindungsleitungen.

Bei Meßaufgaben, bei denen eine der beiden Größen, L_x oder r_x , so klein ist, daß nur die letzten Dekadenstufen für den Abgleich verwendet werden können, muß zwangsläufig eine Restspannung verbleiben, weil die Brücke nicht vollkommen abgeglichen werden kann. Die Meßgenauigkeit leidet natürlich darunter; im Abschnitt über die Meßfehler wird dies noch näher erläutert (siehe 4.2.7.). Sollte die Beseitigung der Restspannung unbedingt erforderlich sein, so kann den Meßobjektklemmen ein geeichter Drehkondensator bzw. veränderbarer Widerstand parallelgeschaltet werden, mit dessen Hilfe der Abgleich verbessert wird. Der eingestellte C- oder R-Wert muß dann rechnerisch berücksichtigt werden. Wegen der dabei gegebenen Fehlermöglichkeiten empfiehlt sich dieses Verfahren nur in Ausnahmefällen, zumal die Abgleichelemente der LCB bei normalen Meßobjekten stets einen einwandfreien Abgleich ermöglichen.

Um sich in Zweifelsfällen Klarheit über die Ausgangsspannung der Brücke verschaffen zu können, sind die Nomogramme Bild 9 und 10 berechnet, deren Anwendung nachfolgend erläutert wird.

Verstimmt man die vollständig abgeglichene Brücke mit den L-Abgleichdekaden um ein bestimmtes Maß $\Delta L_x / L_x$, z.B. $\Delta L_x / L_x = 0,001$, d.h. 0,1 %, so mißt man am Ausgang eine Spannung

$$U_{2L} = U_1 \cdot \frac{\Delta L_x}{L_x} \cdot K, \quad (16)$$

E 7393
761
Bl. 20



wobei

$$K = \ddot{u}_1 \cdot \ddot{u}_2 \cdot \frac{\omega L_x \cdot R_1}{(r_x + R_1)^2 + (\omega L_x)^2} \quad (17)$$

(16) ist gültig für $\Delta L_x / L_x \leq 0,2$

U_1 = Spannung an der Eingangsbuchse der LCB

U_{2L} = Spannung an der Ausgangsbuchse der LCB

R_1 = Brückenwiderstand gemäß Tabelle 1

$\ddot{u}_1$ = Übersetzungsverhältnis des Eingangsübertragers, $\ddot{u}_1 = 1,1$

$\ddot{u}_2$ = Übersetzungsverhältnis des Ausgangsübertragers, $\ddot{u}_2 = 2,16$

Läßt man dagegen den L-Abgleich unberührt und verstimmt den r_x -Abgleich um das Maß $\Delta r_x / r_x$, z.B. 0,01 (1 %), dann beträgt die Ausgangsspannung

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\Delta r_x}{r_x} \cdot \frac{1}{Q} \cdot K \quad (18)$$

Q = Spulengüte, $Q = \omega L_x / r_x$

K = siehe Gleichung (17) und Bild 9 und 10

Praktisch bietet Gleichung (16) folgende Möglichkeiten:

a) Es kann festgestellt werden, ob bei gegebener Brückeneingangsspannung

U_1 die Ausgangsspannung U_2 vom Anzeigegerät noch angezeigt werden kann oder ob dieses zu unempfindlich ist. Außer U_1 muß bekannt sein, welcher Prozentsatz Verstimmung von L_x ($\Delta L_x / L_x \cdot 100$) oder r_x ($\Delta r_x / r_x \cdot 100$) meßbar sein soll. Dieser Prozentsatz ist ungefähr gleich der geforderten Meßgenauigkeit. Wünscht man beispielsweise den L_x -Wert auf 0,5 % genau, so muß das Anzeigegerät bei Verstimmung der Brücke um $\Delta L_x / L_x = 0,005$ noch einen erkennbaren Ausschlag zeigen. Die Brückeneingangsspannung U_1 , die für die Berechnung benötigt wird, kann einmal durch die maximale Spannungsabgabe des Meßsenders gegeben sein, zum anderen durch die verlangte Spannung U_x am Meßobjekt. Man kann U_1 mit Hilfe folgender Gleichung berechnen:

$$U_1 = \frac{U_x}{1,1} \cdot \frac{\left(\frac{r_x + R_1}{\omega L_x} \right)^2 + 1}{\sqrt{\left(\frac{r_x (r_x + R_1)}{(\omega L_x)^2} + 1 \right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_x} \right)^2}} \quad (19)$$

b) Wenn infolge hoher Güte der zu messenden Spule nicht genügend Stufen für den Abgleich des kleinen r_x -Wertes zur Verfügung stehen, liefert

R 7393
761
Bl. 21



die letzte abgleichbare r_x -Stufe eine Ausgangsspannung U_2 , die wesentlich größer ist als die der restlichen L_x -Verstimmung. Die r_x -Spannung überdeckt dann die L_x -Spannung und der L_x -Abgleich wird unscharf. Auch dies ist mit Gleichung (16) berechenbar.

- c) Bei Meßaufgaben, bei denen die Güte sehr klein ist, kann der umgekehrte Fall von b) auftreten, nämlich der, daß die nicht ausreichend abgleichbare L_x -Spannung die des r_x -Abgleiches überdeckt und deren Minimum trübt.

Für grafischen Ermittlung der Brückenausgangsspannung ist der Faktor K (Gleichung (17)) für die Meßbereiche 1 mH bis 1 H in Bild 9, für 10 H bis 1000 H in Bild 10 über der Induktivität L_x' aufgetragen. Bild 9 gilt unmittelbar für eine Meßfrequenz von 1 kHz, Bild 10 für 50 Hz. Parameter ist die Spulengüte $Q = \omega L_x / r_x$.

Bei Frequenzen, die von 1 kHz bzw. 50 Hz abweichen, ist der mutmaßliche L-Wert der zu messenden Spule mit dem Verhältnis Meßfrequenz / 1 kHz bzw. Meßfrequenz / 50 Hz zu multiplizieren und der Faktor K über der so gefundenen Induktivität L_x' aufzusuchen.

Die Ausgangsspannung für die LCB findet man nun folgendermaßen:

Erforderlich sind: zu erwartender Wert der Induktivität L_x

Meßfrequenz f

zu erwartende Spulengüte $Q = \omega L_x / r_x$

Maß der L_x -Verstimmung $\Delta L_x / L_x$, die noch erkennbar sein soll

Maß der r_x -Verstimmung $\Delta r_x / r_x$, die noch erkennbar sein soll

(beide Verstimmungsmaße müssen unter 0,2 bleiben)

Brückeneingangsspannung U_1

Der zu erwartende L_x -Wert wird multipliziert

in den Bereichen 1 mH...1 H mit der Frequenz f in kHz,
in den Bereichen 10 H...1000 H mit $\frac{f/\text{Hz}}{50}$.

Man erhält dadurch $L_x' = L_x \cdot f$ bzw. $L_x' = L_x \cdot f/50$

Über L_x' wird eine Senkrechte errichtet bis zum Schnitt mit der Kurve, die für den Meßbereich und die Spulengüte gültig ist.

R 7393
761
Bl. 22



Durch diesen Schnittpunkt wird eine Parallele zur Abszisse gezogen, die auf der Ordinate den Wert K auffinden läßt.

Die Ausgangsspannungen ergeben sich zu:

$$L_x\text{-Verstimmung: } U_{2L} = K \cdot \frac{\Delta L_x}{L_x} \cdot U_1 \quad (16)$$

$$r_x\text{-Verstimmung: } U_{2r} = \frac{K}{Q} \cdot \frac{\Delta r_x}{r_x} \cdot U_1 \quad (18)$$

Beispiel 1

$L_x = 0,2 \text{ mH}$, (Meßbereich 1 mH)

$f = 10 \text{ kHz}$

$Q \approx 100$ ($r_x \approx 0,12 \Omega$)

Gewünschte Ablesegenauigkeit für L_x : $\Delta L_x / L_x \cdot 100 = 1 \% (10^{-2})$

Gewünschte Ablesegenauigkeit für r_x : $\Delta r_x / r_x \cdot 100 = 5 \% (5 \cdot 10^{-2})$

$U_1 = 1 \text{ V}$

$L_x' = L_x \cdot f / \text{kHz} = 2 \text{ mH}$

Man findet: $K = 1,2$

und berechnet: $U_{2L} = K \cdot \Delta L_x / L_x \cdot U_1 = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 12 \text{ mV}$

$U_{2r} = K/Q \cdot \Delta r_x / r_x \cdot U_1 = 1,2/100 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 500 \text{ } \mu\text{V}$

Das Anzeigegerät muß also bei 500 μV noch einen sichtbaren Zeigerausschlag liefern. Bei der Messung einer Induktivität von 0,2 mH kann der Abgleich nicht nur bis auf das gewünschte eine Prozent, sondern weiter bis auf 0,1 μH , d.h.

$$\frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{10^{-7}}{2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-4}$$

durchgeführt werden. Die Brückenspannung, die sich hierbei ergibt, beträgt

$$U_{2L}' = 1,2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 600 \text{ } \mu\text{V}$$

Wird die Brücke sorgfältiger abgeglichen, d.h. in diesem Falle nicht nur auf 1 %, sondern auf 0,1 $\mu\text{H} \triangleq 0,05 \%$, dann sind die Spannungen U_{2L} und U_{2r} in der gleichen Größenordnung und überdecken sich nicht gegenseitig. Das Minimum ist also sehr scharf.

B. 23
761
Bl. 23



Beispiel 2

$$L_x = 20 \mu H$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

$$Q \approx 100 (r_x \approx 12 \text{ m}\Omega)$$

$$\text{Gewünscht: } \frac{\Delta L_x}{L_x} \cdot 100 = 1 \% (10^{-2})$$

$$\text{Gewünscht: } \frac{\Delta r_x}{r_x} \cdot 100 = 5 \% (5 \cdot 10^{-2})$$

$$U_1 = 1 \text{ V}$$

$$\text{man findet: } K = 2,8 \cdot 10^{-1}$$

$$\text{und berechnet: } U_{2L} = K \cdot \frac{\Delta L_x}{L_x} \cdot U_1 = 2,8 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 2,8 \text{ mV}$$

$$U_{2r} = \frac{K}{Q} \cdot \frac{\Delta r_x}{r_x} \cdot U_1 = \frac{2,8 \cdot 10^{-1}}{100} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 140 \mu V$$

L_x ist nicht nur auf 1 %, sondern weiter abgleichbar auf $0,1 \mu H / 20 \mu H = 5 \cdot 10^{-3} \approx 0,5 \%$. Bei sorgfältigem Abgleich der L_x -Dekaden bleibt somit eine restliche Brückenspannung von

$$U_{2L}' = 2,8 \cdot 10^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 1,4 \text{ mV}$$

Diese Spannung ist zehnmal größer als U_{2r} . Das bedeutet, daß der r_x -Abgleich nicht auf 5 % genau durchführbar ist, weil das r_x -Minimum von U_{2L}' überdeckt wird.

4.2.7. Meßergebnis

Die Meßwerte, die Induktivität L_x und der Reihenverlustwiderstand r_x , können unmittelbar in den Fenstern (4) und (13) abgelesen werden (siehe Bild 5). In den Fenstern (6) und (15) erscheinen die Maßeinheiten, der Punkt (5) bzw. (14) gibt die Kommastelle an.

Die in der LCB verwendeten Normalien haben naturgemäß gewisse Fehler, wie Abgleichgenauigkeit, Temperaturabhängigkeit und Phasenfehler. Die Gesamtheit dieser Fehler bestimmt die Meßgenauigkeit der Brücke.



Wegen ihrer Vielfalt ist eine einheitliche Toleranzangabe nicht möglich. Alle Meßfehler sind jedoch in Diagrammen zusammengefaßt, aus denen die zu erwartende Fehlergrenze auch für ungewöhnliche Meßaufgaben abgelesen werden kann.

In Bild 11...13 findet man die Induktivitäts-Fehlergrenzen, die im Temperaturbereich $+10^{\circ} \dots +30^{\circ} \text{ C}$ auftreten können, wenn Spulen unbekannter Induktivität gemessen werden. Da es sich nur um den Betrag des möglichen Fehlers handelt, können die abgelesenen Werte nicht zur Korrektur der Meßergebnisse verwendet werden.

In den Kurven ist u.a. der Tatsache Rechnung getragen, daß bei kleinen L_x -Werten wegen der begrenzten Zahl von abgleichbaren L_x -Dekaden ein sogenannter Schrittfehler entsteht. Ist beispielsweise eine Induktivität von $10 \mu\text{H}$ zu messen, so läßt sich L_x im niedrigsten Bereich mit dem Drehknopf nur auf $\pm 0,1 \mu\text{H}$, d.h. $0,1/10 \cdot 100 = 1 \%$ genau angeben. Da man eine halbe Stufe, $0,05 \mu\text{H}$, eventuell noch abschätzen kann, wird der Schrittfehler nur etwa $0,5 \%$ ausmachen. Diese Annahme, daß der letzte halbe Schritt noch geschätzt werden kann, wurde bei der Berechnung der Kurven zugrunde gelegt. Beim Abgleich von Spulen auf einen L -Wert, der an der LCB eingestellt wird, entfällt der Schrittfehler naturgemäß, so daß der Meßfehler um den Betrag $\pm 5 \cdot 10^{-2} L_{\text{max}}/L_x [\%]$ geringer ist. (L_{max} = Nennwert des eingeschalteten Meßbereichs; L_x = gemessene Induktivität.)

Die L_x -Fehler sind im gesamten Frequenzbereich der LCB frequenzunabhängig. In den Bereichen $1 \text{ mH} \dots 10 \text{ H}$ spielt auch die Größe der Verlustwiderstände r_x keine Rolle. Diese wirken sich erst in den oberen beiden Bereichen, 100 H und 1000 H , als Parameter aus.

Der Fehler der Verlustwiderstandsmessung hängt in komplizierter Weise von Frequenz, Meßbereich, Induktivität und der Größe des Widerstandes selbst ab. In Bild 14 bis 16 sind Nomogramme zur Bestimmung der r_x -Fehler dargestellt. Die Fehlergrenze wird wie folgt ermittelt:

D 7:93

Bl. 25



- a) Auf der waagrechten L_x -Achse wird der erwartete L_x -Wert aufgesucht (in Bild 14 eingetragenes Beispiel: 3 mH).
- b) Von L_x wird eine Senkrechte gefällt bis zum Schnitt mit der schrägen Geraden, die für den betreffenden Meßbereich gültig ist (im Beispiel Bereich 10 mH).
- c) Vom Schnittpunkt mit der Bereichsgeraden wird eine Parallele zur L_x -Achse gezogen bis zum Schnitt mit der Geradenschar, die die Frequenzmaßstäbe trägt.
- d) In den Bereichen 1 mH...10 H sind jeder Geraden 3 Frequenzen zugeordnet; der Frequenzmaßstab verläuft zuerst von links nach rechts, kehrt dann um und läuft nach links, um dann wieder nach rechts zurückzukehren. In den Bereichen 100 H und 1000 H ist jeder Geraden nur eine Frequenz zugeordnet. Man sucht nun den Schnittpunkt der waagrechten Hilfslinie mit der Frequenzgeraden, die für die Meßfrequenz gilt (im Beispiel 5 kHz).
- e) Auf diesem Schnittpunkt wiederum wird eine Senkrechte errichtet, die bis in den oberen rechten Quadranten hineinreicht.
- f) Jeder Kurve im oberen rechten Quadranten ist ein r_x -Parameter zugeordnet, dessen Größe noch vom jeweiligen Meßbereich abhängig ist. Man sucht am r_x -Maßstab den erwarteten r_x -Wert (im Beispiel $r_x = 2 \Omega$) auf und verfolgt die zugehörige Kurve bis zum Schnitt mit der senkrechten Hilfslinie, die aus dem unteren Quadranten kommt.
- g) Vom Schnittpunkt zieht man eine waagrechte Hilfslinie bis zur Ordinate, auf der der r_x -Fehler abgelesen wird (im Beispiel $\pm 1,5 \%$).

Die Fehlergrenzen, die aus den Bildern 14 bis 16 entnommen werden können, sind ausschließlich durch die Meßbrücke gegeben. Das Meßobjekt selbst kann jedoch auch Meßfehler durch seine Eigenkapazität verursachen. Je näher die Meßfrequenz an die Eigenresonanz des aus Induktivität und Spulenkapazität gebildeten Schwingkreises heranrückt, desto größer wird der Fehler. Man mißt stets eine zu große Induktivität. Der Fehler läßt sich berechnen, wenn die Spulenkapazität bekannt ist:

$$F = + \frac{\omega^2 L_x C_e}{1 - \omega^2 L_x C_e} \quad (20)$$

Für die Meßfrequenzen 50 Hz und 1 kHz wurde der Fehler berechnet und in Bild 17 und 18 grafisch dargestellt. Parameter ist die Kapazität C_{ges} , die sich aus der Spulenkapazität und der Verdrahtungskapazität der LCB zusammensetzt. Gleichung (20) und die Kurven gelten nur für Spulen mit einer Güte über 10. Für Meßobjekte mit geringerer Güte ist der Zusammenhang komplizierter. Die Kurven können aber auf jeden Fall dazu dienen, den eventuellen Fehler wenigstens in seiner Größenordnung abzuschätzen. Bei Spulen mit $Q \geq 10$ kann das auf der LCB abgelesene Meßergebnis L_{gem} korrigiert werden, wenn C_{ges} hinreichend genau bekannt ist:

$$L_{ist} = \frac{L_{gem}}{1 + \omega^2 L_{gem} \cdot C_{ges}} \quad (21)$$

Hierbei ist $C_{ges} = C_s + \text{Verdrahtungskapazität der LCB (10 pF)}$.

Die in Abschnitt 1.1. erwähnte Serieninduktivität der LCB-Verdrahtung ist so gering, daß sie zum Meßfehler keinen Beitrag liefern kann.

4.3. Kapazitätsmessung

4.3.1. Anschließen des Generators und Anzeigegerätes

Es gilt das im Abschnitt 4.2.1. Gesagte.

4.3.2. Anschließen des Meßobjektes

Der zu messende Kondensator wird an die Klemmen (20) (siehe Bild 5) angeschlossen. Der geerdete oder im Betrieb an Masse liegende Anschluß ist an die mit einem Massezeichen gekennzeichnete Klemme zu legen, die unmittelbar mit dem Gehäuse der LCB Verbindung hat.

4.3.3. Einstellen des Meßbereiches

Mit dem Drehknopf (12) wird der Meßbereich eingestellt und vom Zeiger (11) angezeigt. Wenn die zu erwartende Größe der Kapazität nicht bekannt ist, stelle man einen mittleren Bereich ein. Beim Abgleich merkt man dann sehr bald, ob er beibehalten werden kann oder ob auf einen anderen umgeschaltet werden muß. Man wähle stets den kleinstmöglichen Meßbereich, um die Genauigkeit der Brücke voll ausnutzen zu können.

7493
Bl. 27



4.3.4. Einstellen der Meßspannung

Die Größe der Meßspannung wird nach oben durch die Belastbarkeit der Brücke und nach unten durch die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes begrenzt. Im einzelnen ist zu beachten:

4.3.4.1. Belastbarkeit der Brücke

Die maximal zulässige Brückeneingangsspannung entnimmt man Bild 6.

4.3.4.2. Spannung am Meßobjekt

Bei der Messung von Papierkondensatoren, Styroflexkondensatoren u.dgl. spielt die Spannung am Meßobjekt im allgemeinen keine Rolle, zumal sie wegen der begrenzten Brückeneingangsspannung nicht größer als 30 V werden kann.

Werden dagegen Elektrolytkondensatoren oder sonstige spannungsabhängige Objekte gemessen, dann muß eine definierte Spannung festgelegt werden, damit man reproduzierbare Meßwerte erhält. Die Spannung kann unmittelbar an den Anschlußklemmen (20) gemessen werden, wenn ein hochohmiges Röhrenvoltmeter verwendet wird, z.B. unser NF-Millivoltmeter Type UVN. Lediglich bei der Messung von Kapazitäten unter 1 μF und $\tan\delta$ -Werten unter 0,1 ist Vorsicht geboten, da die Brücke durch den Eingangsscheinwiderstand des Voltmeters verstimmt werden kann. In diesem Fall mißt man besser die Brückeneingangsspannung, da diese bei hochohmigen Meßobjekten etwa gleich der Meßobjektspannung ist. Der genaue Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_1 und der Spannung U_x am zu messenden Kondensator läßt sich berechnen zu

$$\left| \frac{U_1}{U_x} \right| = 0,91 \sqrt{(1 + G_x R_1)^2 + (\omega C_x R_1)^2} \quad (22)$$

U_1 = Brückeneingangsspannung

U_x = Spannung am Meßobjekt

C_x = gemessene oder geschätzte Kapazität des Meßobjektes

G_x = gemessener oder geschätzter Leitwert des Meßobjektes

R_1 = Brückenwiderstand gemäß Bild 2 und Tabelle 1 (Blatt 18)

Gleichung (22) wird vor allem dazu dienen, die Frage nach der erforderlichen Eingangsspannung zu beantworten, wenn eine bestimmte Spannung am Meß-

7393
741
Bl. 28



objekt vorgeschrieben ist. Bei ungünstigen Aufgabenstellungen kann es nämlich vorkommen, daß die erforderliche Brückenspannung über die bei der LCB zulässigen Grenze hinausgeht (siehe Bild 6). In einem solchen Fall kann man sich nutzlose Versuche ersparen und eine evtl. Überlastung der Brücke vermeiden.

Wird die Frage nach dem Verhältnis $\left| \frac{U_1}{U_x} \right|$ öfter gestellt, so bediene man sich des Nomogramms Bild 19. Die Spannung U_x oder U_1 findet man daraus wie folgt:

a) Gegeben müssen sein:

Geschätzte oder gemessene Kapazität C_x

Geschätzter oder gemessener Leitwert G_x

Meßfrequenz f

U_1 oder U_x

b) Linkes Diagramm:

Auf der G_x -Achse wird der Wert G_x aufgesucht (im Beispiel 10 mS) und eine Senkrechte bis zum Schnitt mit der Kurve $A = F(G_x)$ errichtet (Meßbereich beachten). Auf der Ordinate links wird der Wert A abgelesen (im Beispiel $A = 4,0$).

c) Rechtes Diagramm:

Auf der C_x -Achse wird der C_x -Wert aufgesucht (im Beispiel 2 μF) und eine Senkrechte bis zum Schnitt mit der schrägen Geraden errichtet, die für die Meßfrequenz f gültig ist. Auf der Ordinate rechts wird der Hilfswert B abgelesen (im Beispiel $B = 6,3$).

d) Der unter b) gefundene Hilfswert A ist zu B hinzuzuzählen.

e) Auf der rechten Ordinate sucht man den Wert $(A + B)$ (im Beispiel $A + B = 10,3$) auf und zieht von dort eine Parallele zur C_x -Achse bis zum Schnitt mit der schrägen Geraden $\left| \frac{U_1}{U_x} \right| = F(C_x)$. Im Schnittpunkt errichtet man eine Senkrechte bis zur oberen $\left| \frac{U_1}{U_x} \right|$ -Achse, auf der der Wert $\left| \frac{U_1}{U_x} \right|$ abgelesen wird (im Beispiel $\left| \frac{U_1}{U_x} \right| = 2,8$).

f) Die gesuchte Spannung U_x oder U_1 erhält man zu:

$$U_x = \frac{U_1}{\left| \frac{U_1}{U_x} \right|} \quad (23)$$

$$U_1 = U_x \left| \frac{U_1}{U_x} \right| \quad (24)$$

7393
761
Bl. 29



Je nach Meßfrequenz wird der Wert für U_x etwas kleiner sein als nach (23) berechnet, weil der Eingangsübertrager der Brücke eine Dämpfung verursacht. Unterhalb 1 kHz macht der Verlust etwa 10 % aus, darüber steigt er vor allem bei niederohmigen Objekten sehr stark an.

4.3.5. Messung mit Gleichvorspannung

Obwohl man die Kapazität von Elektrolytkondensatoren auch ohne Gleichvorspannung messen kann, wenn die Wechselspannung einige Zehntel Volt nicht überschreitet, wird doch zuweilen die Notwendigkeit auftauchen, an das Meßobjekt eine Gleichspannung anzulegen. Auch dies ist mit der LCB möglich, wenn dabei gewisse Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden.

Die Gleichspannung wird an die Klemmen (2) (siehe Bild 5) angelegt, in die man bei Induktivitätsmessungen den Gleichstrom einspeist. Die Schaltung entspricht Bild 3, und zwar diesmal mit geeignet bemessenem Schmelzeinsatz, da man damit rechnen muß, daß der Kondensator während der Messung durchschlägt. In diesem Fall würde der Brückenwiderstand „ R_1 “ verbrennen. Den Nennstrom der Sicherung entnimmt man Tabelle 4. Wegen der unsicheren Abschaltung bei kleinen Überlastungen muß der Nennwert kleiner als der maximal zulässige Gleichstrom gewählt werden. Aus Tabelle 4 sind auch die zulässigen Spannungs- und Stromwerte entnehmbar, die nicht überschritten werden dürfen.

Tabelle 4. Gleichvorspannung bei C-Messungen
Zulässige Spannungs- u. Stromwerte

Bereich	$U_{\max}$	$I_{\max}$	Nennstrom der Sicherung nach C DIN 41571
1 μF	140 V	0,3 A	0,16 A
10 μF	210 V	0,3 A	0,16 A
100 μF	250 V	0,3 A	0,16 A
1000 μF	250 V	1,0 A	0,6 A

1093
Bl. 30



4.3.6. Abgleich

Der Brückenabgleich wird durch abwechselndes Verstellen der C_x -Dekaden mit den Knöpfen (7) bis (10) und der G_x -Dekaden mit den Knöpfen (16) bis (18) erreicht. Über Einzelheiten schlage man Abschnitt 4.2.6. nach.

Die Brückenausgangsspannung bei gegebener Verstimmung der Brücke kann im Bedarfsfall berechnet werden zu:

$$U_{2G} = U_1 \cdot \frac{\Delta C_x}{C_x} \cdot K \quad (25)$$

mit

$$K = \ddot{u}_1 \cdot \ddot{u}_2 \cdot \frac{\omega C_x \cdot R_1}{\sqrt{(G_x R_1 + 1)^2 + (\omega C_x R_1)^2}} \quad (26)$$

und

$$U_{2G} = U_1 \cdot \frac{\Delta G_x}{G_x} \cdot K \cdot \tan \delta_x \quad (27)$$

U_1 = Spannung an der Eingangsbuchse der LCB

$U_{2G, G}$ = Spannung an der Ausgangsbuchse der LCB

R_1 = Brückenwiderstand gemäß Bild 2 und Tabelle 1

$\ddot{u}_1$ = Übersetzungsverhältnis des Eingangsübertragers, $\ddot{u}_1 = 1,1$

$\ddot{u}_2$ = Übersetzungsverhältnis des Ausgangsübertragers, $\ddot{u}_2 = 2,16$

$\Delta C_x / C_x$ = Maß für die C_x -Verstimmung

$\Delta G_x / G_x$ = Maß für die G_x -Verstimmung

$\tan \delta_x$ = Verlustfaktor des Meßobjektes

Die Nutzanwendung der Gleichung (25) und (27) ist die gleiche wie in Abschnitt 4.2.6. beschrieben. In Bild 20 wurde der Faktor K von Gleichung (26) grafisch aufgetragen. Mit dem Diagramm läßt sich die Ausgangsspannung wie folgt ermitteln:

a) Erforderlich sind:

Zu erwartender Wert der Kapazität C_x

Meßfrequenz f

Zu erwartender Verlustfaktor $\tan \delta_x$ des Meßobjektes

Maß der C_x -Verstimmung $\Delta C_x / C_x$, die noch erkennbar sein soll

Maß der G_x -Verstimmung $\Delta G_x / G_x$, die noch erkennbar sein soll

$$\left(\frac{\Delta C_x}{C_x} \text{ und } \frac{\Delta G_x}{G_x} \leq 0,2 \right)$$

Die Brückeneingangsspannung U_1



- b) Der zu erwartende C_x -Wert wird mit dem Faktor

$$\frac{\text{Meßfrequenz (Hz)}}{50}$$

multipliziert; man erhält

$$C_x' = C_x \cdot f/50$$

- c) Über C_x' wird eine Senkrechte errichtet bis zum Schnitt mit der Kurve, die für den Meßbereich und den Verlustfaktor des Meßobjektes gültig ist.
- d) Durch diesen Schnittpunkt wird eine Parallele zur Abszisse gezogen, die auf der Ordinate den Wert K auffinden läßt.
- e) Die Ausgangsspannungen ergeben sich zu:

$$C_x\text{-Verstimmung: } U_{2G} = K \cdot \Delta C_x / C_x \cdot U_1 \quad (25)$$

$$G_x\text{-Verstimmung: } U_{2G} = K \cdot \tan \delta_x \cdot \Delta G_x / G_x \cdot U_1 \quad (27)$$

4.3.7. Meßergebnis

Die Meßwerte, die Kapazität C_x und der Parallellleitwert G_x , können unmittelbar in den Fenstern (4) und (13) (siehe Bild 5) abgelesen werden. In den Fenstern (6) und (15) erscheinen die Maßeinheiten, während die Punkte (5) und (14) die Kommastelle angeben.

Die Fehlergrenzen für die Messung unbekannter Kapazitäten findet man in den Bildern 21. bis 23. Die Kurven gelten für einen Temperaturbereich von $+10^\circ \dots +30^\circ \text{ C}$. Der Ermittlung der Fehlerkurven lagen die gleichen Gesichtspunkte zugrunde wie bei den im Abschn. 4.2.7. beschriebenen L_x -Fehlerkurven.

Die G_x -Fehlergrenzen sind schließlich in Bild 24 wiedergegeben. Zur Ermittlung des möglichen G_x -Fehlers geht man folgendermaßen vor:

- a) Auf der waagrechten C_x -Achse wird der erwartete C_x -Wert aufgesucht (im Bild 24 eingetragenes Beispiel: 5 μF).
- b) Von C_x wird eine Senkrechte gefällt bis zum Schnitt mit der schrägen Geraden, die für den betreffenden Meßbereich gültig ist (im Beispiel: 10 μF).



- c) Vom Schnittpunkt mit der Bereichsgeraden wird eine Parallele zur C_x -Achse gezogen bis zum Schnitt mit der Geradenschar, die die Frequenzmaßstäbe trägt.
- d) Im Schnittpunkt mit derjenigen Geraden, die in dem betreffenden Meßbereich für die gewünschte Meßfrequenz gültig ist, errichtet man eine Senkrechte, die bis in den oberen Quadranten hineinreicht.
- e) Jeder Kurve im oberen rechten Quadranten ist ein G_x -Parameter zugeordnet, dessen Größe vom jeweiligen Meßbereich abhängig ist. Man sucht am G_x -Maßstab den erwarteten G_x -Wert auf (im Beispiel: 200 μS) und verfolgt die zugehörige Kurve bis zum Schnitt mit der senkrechten Hilfslinie, die aus dem unteren Quadranten kommt.
- f) Vom Schnittpunkt zieht man eine waagrechte Hilfslinie bis zur Ordinate, auf der der G_x -Fehler abgelesen wird (im Beispiel: 2,5 %).

Die C_x -Fehlergrenzen nach Bild 21 bis 23 sind zwischen 50 Hz und 20 kHz frequenzunabhängig. Bei der Messung großer Kapazitäten mit Frequenzen über 500 Hz muß jedoch ein weiterer Fehler berücksichtigt werden, der durch die Induktivität der Verdrahtung in der LCB entsteht. Diese Induktivität, die etwa 0,08 μH ausmacht, bewirkt, daß die Kapazität zu groß gemessen wird. Der Fehler in % beträgt

$$F_C = \frac{C_{gem} - C_{ist}}{C_{ist}} \cdot 10^2 = \frac{\omega^2 L C_{ist}}{1 - \omega^2 L C_{ist}} \cdot 10^2 \quad [\%] \quad (28)$$

C_{gem} = gemessener C_x -Wert

C_{ist} = wahrer C_x -Wert

L = Induktivität der Verdrahtung (bei der LCB = 0,08 μH)

Gleichung (28) gilt, wenn der Verlustfaktor des Meßobjektes $\tan \delta_x \leq 0,1$ ist.

Im Bild 25 ist der Meßfehler grafisch aufgetragen. Im Bedarfsfall kann man das Meßergebnis auch korrigieren, so daß auch ausgefallene Meßaufgaben gelöst werden können. Da die Induktivität der Geräteverdrahtung nur auf etwa 10 % genau angegeben werden kann, ist in diesem Fall natürlich nicht die gleiche Meßgenauigkeit erreichbar wie bei der Messung mit niederen Frequenzen. Für $\tan \delta_x \leq 0,1$ gilt:

$$C_{ist} = \frac{C_{gem}}{1 + \omega^2 L C_{gem}} \quad (29)$$



Bei größeren $\tan\delta_x$ -Werten ist wegen des verwickelten Zusammenhanges zwischen den einzelnen Größen eine Korrektur unmöglich.

Die Kapazität der LCB-Verdrahtung ist mit etwa 10 pF so gering, daß sie in den C_x -Bereichen keinen Fehler verursachen kann.

4.4. Verwendung als Präzisionskondensator und -Leitwert

Mit dem Schalterknopf (12) wird der Bereich „C-Normal“ eingestellt. Im Klemmenpaar (20) liegt dann die Parallelschaltung eines von 0,1 nF bis 1,1112 μ F veränderbaren Kondensators mit einem von 0,1 μ S...1,2221 mS veränderbaren Leitwert.

Die eingestellten C- und G-Werte sind in den Fenstern (4) und (13) ablesbar, die Maßeinheit in den Fenstern (6) und (15), und die Punkte (5) und (14) deuten die Kommastellung an.

Wie man aus den Daten von Abschnitt 1.3. und 1.4. ersieht, sind die Toleranzen der einzelnen C- und G-Dekaden nicht gleich, da man bei den Brückenmessungen, für die die Normalien ja hauptsächlich gedacht sind, die Genauigkeit der letzten Dekaden wegen des Schrittfehlers (siehe Abschnitt 4.2.7.) nicht ausnutzen könnte. Man hat deshalb zum Teil Schaltelemente mit größeren Toleranzen verwendet. Die Fehlergrenzen der C-Dekaden enthält Bild 26, die der G-Dekaden Bild 27.

Bei Verwendung des Stufenkondensator sind die max. Spannungsbelastbarkeit von 50 V_{eff} und beim Stufenleitwert die in Abschnitt 1.4. angegebenen max. Belastungen der einzelnen Dekaden zu beachten.

Die Leitungsinduktivität, die innerhalb der LCB in Reihe zum Stufenkondensator liegt, beträgt je nach Einstellung max. etwa 0,45 μ H. Durch diese Induktivität wird die Kapazität scheinbar größer. Der Fehler kann mit Gleichung (28) berechnet werden. Er tritt erst bei Frequenzen über 2 kHz in Erscheinung. Zur überschlägigen Fehlerabschätzung kann man auch das Diagramm Bild 25 verwenden, wenn man den Fehler nicht über dem eingestellten Wert C, sondern über $C' = 0,45 \mu\text{H}/0,08 \mu\text{H} \cdot C = 5,6 \cdot C$ aufsucht.



Der Verlustfaktor der Dekade mit $12 \times 100 \text{ pF}$ beträgt etwa $1 \cdot 10^{-3}$, bei den übrigen Dekaden ist der $\tan \delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$. Wird der Kondensator mit einer Frequenz über 1 kHz betrieben, so muß u.U. der Leitungswiderstand der LCB-Verdrahtung berücksichtigt werden, der etwa $20 \text{ m}\Omega$ beträgt und der z.B. bei $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ und $f = 2 \text{ kHz}$ einen zusätzlichen Verlustfaktor von

$$\tan' \delta \approx \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ }\Omega}{80 \text{ }\Omega} = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

verursacht.

393
Bl. 35



5. Schaltteilliste

(Änd.-Zust. „d“ Nr. 5788)

Kenn- zei- chen	Benennung	Wert	R&S-Sach-Nr.
C1	Scheibentrimmer Keramikkondensator bzw. Kf-Kondensator	10...60 pF etwa 300 pF	CV 944 CCH 68/... bzw. CKD 1/.../125 parallel
C2	Kf-Kondensator	5000 pF/500 V	CKS 5000/500
C3	MP-Kondensator	2 pF/250 V	CMR 2/250
C4	Kf-Kondensator	5000 pF/250 V	CKS 5000/250
C7	Styroflexkondensator	100 000 pF	} 532 - 6/13
C9	Styroflexkondensator	300 000 pF	
C8	Styroflexkondensator	200 000 pF	} 532 - 6/24
C10	Styroflexkondensator	400 000 pF	
C11	Styroflexkondensator	10 000 pF	} 532 - 5/13
C13	Styroflexkondensator	30 000 pF	
C12	Styroflexkondensator	20 000 pF	} 532 - 5/24
C14	Styroflexkondensator	40 000 pF	
C15	Scheibentrimmer Styroflexkondensator	1000 pF	CV 944 parallel } 532 - 4/13
C17	Styroflexkondensator Scheibentrimmer	3000 pF	CV 944 parallel
C16	Scheibentrimmer Styroflexkondensator	2000 pF	CV 944 parallel } 532 - 4/24
C18	Styroflexkondensator Scheibentrimmer	4000 pF	CV 944 parallel
C19	Scheibentrimmer Keramikkondensator	10...60 pF 82 pF	CV 944 CCH 68/82 parallel
C20	Scheibentrimmer Keramikkondensator	10...60 pF 150 pF	CV 944 CCH 68/150 parallel
C21	Scheibentrimmer Keramikkondensator	10...60 pF 270 pF	CV 944 CCH 68/270 parallel
C22	Scheibentrimmer Keramikkondensator Keramikkondensator	10...60 pF 470 pF 70...90 pF	CV 944 CCL 55/470 CCH 68/... parallel

Bl. 36



Kenn- zei- chen	Benennung	Wert	R&S-Sach-Nr.
C23	Scheibentrimmer	4...20 pF	CV 924
C24	Scheibentrimmer	2...10 pF	CV 914
C25	Scheibentrimmer	2...10 pF	CV 914
C26	Scheibentrimmer	2...10 pF	CV 914
K1	Abgesch. Doppelleitung		enth. in Tr2
K2	Hochfr.-Kabel		LKK 61 900
L1	Spule		620 - 3.11.4
L2	Spule		620 - 3.11.5
L3	Spule		620 - 3.11.6
R1	Widerstand	10 Ω	620 - 3.10.8
R2	Widerstand	100 Ω	620 - 3.10.10
R3	Widerstand	21,62 k Ω	2 x 620-3.10.18 in Serie
R4	Widerstand	10 k Ω	620 - 3.10.17
R5	Schichtwiderstand Widerstand	400 k Ω /0,5 W 1 k Ω	WF 400 k/0,5 620 - 3.10.12 parallel
R6	Schichtwiderstand Widerstand	400 k Ω /0,5 W 316,1 Ω	WF 400 k/0,5 620 - 3.10.11 parallel
R7	Schichtwiderstand Widerstand	160 k Ω /0,5 W 100 Ω	WF 160 k/0,5 620 - 3.10.10 parallel
R8	Widerstand	31,62 Ω	620 - 3.10.9
R9	Widerstand	10 Ω	620 - 3.10.8
R12	Widerstand	21,62 k Ω	2 x 620-3.10.18 in Serie
R13	Widerstand	10 k Ω	620 - 3.10.17
R14	Widerstand	3,162 k Ω	620 - 3.10.14
R15	Widerstand	1 k Ω	620 - 3.10.12
R16	Widerstand	316,2 Ω	620 - 3.10.11
R17	Widerstand	100 Ω	620 - 3.10.10



Kenn- zei- chen	Benennung	Wert	R&S-Sach-Nr.
R20	Widerstand	10 k Ω	620 - 3.10.17
R21	Widerstand	5 k Ω	620 - 3.10.16
R22	Widerstand	3,333 k Ω	620 - 3.10.15
R23	Widerstand	2 k Ω	620 - 3.10.13
R24	Schichtwiderstand	100 k Ω $\pm$ 0,5 %/2 W	WF 100 k/0,5/2
R25	Schichtwiderstand	50 k Ω $\pm$ 0,5 %/2 W	WF 50 k/0,5/2
R26	Schichtwiderstand	33,33 k Ω $\pm$ 0,5 %/2 W	WF 33,33 k/0,5/2
R27	Schichtwiderstand	20 k Ω $\pm$ 0,5 %/2 W	WF 20 k/0,5/2
R28	Schichtwiderstand	1 M Ω $\pm$ 1 %/1 W	WF 1 M/1/1
R29	Schichtwiderstand	500 k Ω $\pm$ 1 %/1 W	WF 500 k/1/1
R30	Schichtwiderstand	333,3 k Ω $\pm$ 1 %/1 W	WF 333,3 k/1/1
R31	Schichtwiderstand	200 k Ω $\pm$ 1 %/1 W	WF 200 k/1/1
R32	Schichtwiderstand	10 M Ω $\pm$ 2 %/0,5 W	WF 10 M/2/0,5
R33	Schichtwiderstand	5 M Ω $\pm$ 2 %/0,5 W	WF 5 M/2/0,5
R34	Schichtwiderstand	3,33 M Ω $\pm$ 1 %/0,5 W	WF 3,33 M/1/0,5
R35	Schichtwiderstand	2 M Ω $\pm$ 1 %/0,5 W	WF 2 M/1/0,5
R36	Schichtwiderstand	4 k Ω /0,25 W	WF 4 k/0,25
R37	Schichtwiderstand	200 k Ω /0,25 W	WF 200 k/0,25
S1	Bereichschalter		620 - 2.23
S2	Meßschalter		620 - 2.22
S3	Meßschalter		620 - 2.22
S4	Meßschalter		620 - 2.22
S5	Meßschalter		620 - 2.21
S6	Meßschalter		620 - 2.21
S7	Meßschalter		620 - 2.21



Kenn- zei- chen	Benennung	Wert	R&S-Sach-Nr.
S8	Meßschalter		620 - 2.21
S9	Meßschalter		620 - 2.21
Tr1	Eingangsübertrager		620 - 3.14.1
Tr2	Ausgangsübertrager		620 - 3.20

93

39



Garantieverpflichtung

Wir übernehmen für Mängel, die in unseren Geräten als Folge von Fertigungs- oder Materialfehlern auftreten,

1 J A H R G A R A N T I E ,

und zwar nach Maßgabe der Ziffer 5 unserer Lieferungs- und Zahlungsbedingungen.

Ein Anspruch auf Wandlung oder Minderung ist ausgeschlossen. Die Gewährleistung geht nach unserer Wahl auf Instandsetzung oder Ersatz des beanstandeten Werkstückes oder Werkstückteiles. Unsere Gewährspflicht wird nur dann ausgelöst, wenn ein Mangel uns unverzüglich, spätestens innerhalb einer Woche nach Kenntnis schriftlich mitgeteilt ist und wenn innerhalb einer Woche nach Aufforderung durch uns das Werkstück frachtfrei an unser Werk abgesandt ist. Die Rückfracht vom Werk geht ebenfalls zu Lasten des Bestellers. Der Ersatz unmittelbaren oder mittelbaren Schadens ist ausgeschlossen. Die Gewährleistung erlischt, wenn von dritter Seite Veränderungen an dem Werkstück vorgenommen werden.

Plomben und Siegel des Gerätes dürfen nicht verletzt sein. Für Röhren, zu denen Sie keine Garantieunterlagen erhielten, übernehmen wir die Garantieverpflichtung. Schadhafte Röhren, für die Ihrer Meinung nach ein Garantieanspruch besteht, wollen Sie uns zur Prüfung desselben einsenden. Dabei bitten wir, unbedingt anzugeben:

Nummer, Datum und Diktatzzeichen der Rechnung;

Type und Fertigungsnummer (FMr.) des Gerätes;

Bezeichnung des Röhrenschadens.

ROHDE & SCHWARZ • MÜNCHEN

7-83
701
Bl. 40



R 7393

761

Bl. 4

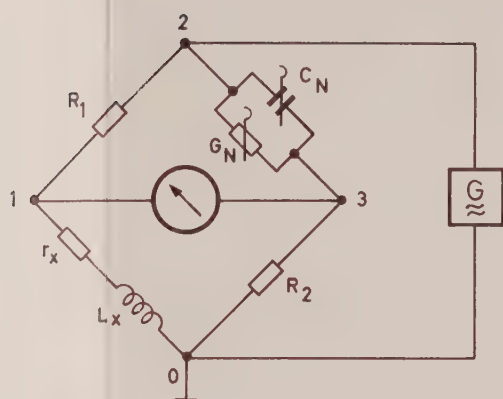


Bild 1.
Prinzipschaltung
Selbstinduktionsmeßbrücke

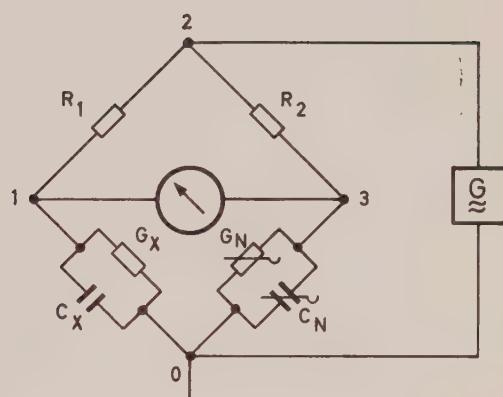


Bild 2.
Prinzipschaltung
Kapazitätsmeßbrücke

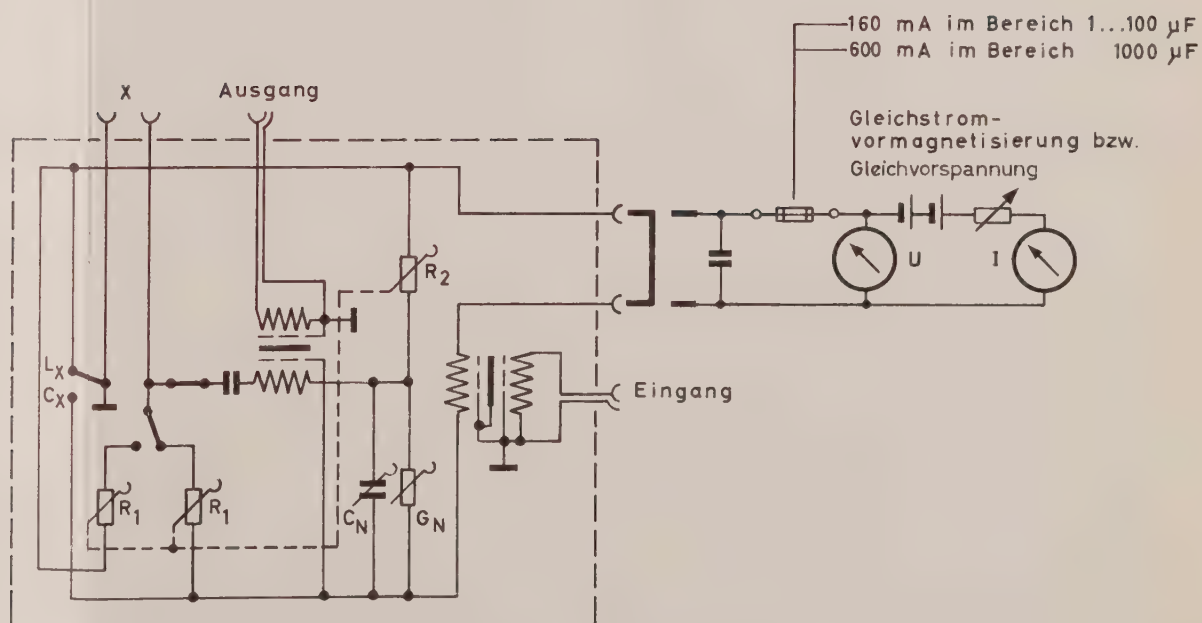


Bild 3.
Vereinfachte Schaltung der L-C-Präzisionsmeßbrücke Type LCB

KURZ-BEDIENUNGSANLEITUNG

zur L-C-Präzisionsmeßbrücke Type LCB
(siehe Bild 5 der Beschreibung)

1. L- und C-Messung

- 1.1. Über koaxiale Kabel anschließen: Generator an (1), Selektiven Anzeigeverstärker an (3).
- 1.2. Generator einschalten und gewünschte Meßfrequenz einstellen; maximal zulässige Brücken-Eingangsspannung nicht überschreiten; siehe Bild 6
- 1.3. Anzeigeverstärker auf höchste Empfindlichkeit einstellen und auf Meßfrequenz abstimmen.
- 1.4. Meßobjekt an (20) anschließen; betriebsmäßig geerdeten Anschluß an linke Klemme.
- 1.5. Mit Schalter (12) Meßbereich wählen; wenn L- bzw. C-Wert des Meßobjektes völlig unbekannt, mittleren Bereich wählen; sonst kleinstmöglichen Bereich, da höchste Genauigkeit.
- 1.6. Brücken-Eingangsspannung (Meßobjekt-Spannung) einstellen; siehe Abschnitte 4.2.4. und 4.3.4. der Beschreibung. Unkritisch bei Luftspulen, Kernen mit großem Luftspalt und normalen Kondensatoren. Kritisch bei Spulen mit hochpermeablem Blech, bei Ferritkernspulen und bei Elektrolytkondensatoren.
- 1.7. Bei Bedarf in (2) Strom bzw. Spannung einspeisen zur Vormagnetisierung bzw. zur Vorspannung. Maximal zulässige Spannungen und Ströme beachten; siehe Tabelle 2 auf Seite 18 der Beschreibung.
- 1.8. Brücken-Abgleich durch abwechselndes Verstellen der Knöpfe (7) bis (10) und (16) bis (19); dabei Minimum der Brücken-Ausgangsspannung aufsuchen. Stets mit dem größten Wert (Knopf (7) bzw. (16)) beginnen. Empfindlichkeit des Anzeigeverstärkers entsprechend vermindern. Nach dem Abgleich evtl. Meßobjekt-Spannung nachprüfen.

1.9. Ablesen des L- bzw. C-Wertes in den Fenstern (4) und (6) mit Komma im Fenster (5).

Ablesen des r- und G-Wertes in den Fenstern (13) und (15) mit Komma im Fenster (14).

1.10. Fehlergrenzen:

für $L_x > 100 \mu H$ $\approx 0,5 \%$, genaue Werte siehe Bild 11...13
für r_x $\approx 3 \%$, genaue Werte siehe Bild 14...16
für $C_x > 100 nF$ $\approx 0,5 \%$, genaue Werte siehe Bild 21...23
für G_x $\approx 3 \%$, genaue Werte siehe Bild 24

2. Die LCB als Präzisions-Kondensator oder -Leitwert

2.1. Schalter (12) auf „C-Normal“ stellen.

2.2. C und G liegen parallelgeschaltet an (20). Maximale Spannung bzw. Belastung beachten; für C gilt 50 V_{eff} , für G siehe Seite 6 Abschnitt 1.4.

2.3. Fehlergrenzen:

für C siehe Bild 26
für G siehe Bild 27

2.4. Verlustfaktor:

Dekade 12 x 100 pF $\tan \delta \approx 1 \cdot 10^{-3}$
übrige Dekaden $\tan \delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$



Eingang
Bei 50 Hz
maximal 4V

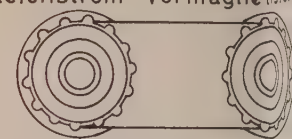


1

4

2

Gleichstrom - Vormagnetisierung

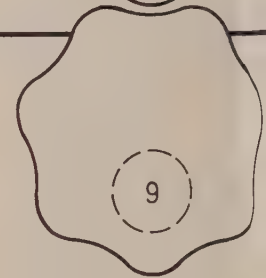
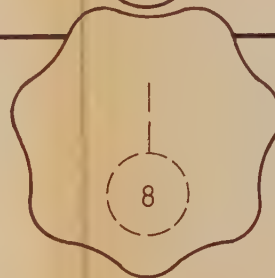


U_{max} und J_{max} nicht überschreiten

0

0

0

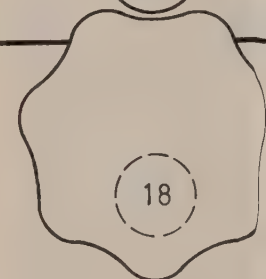
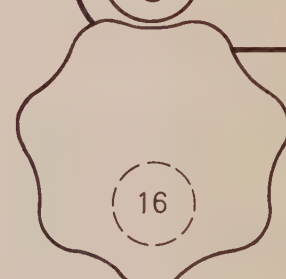


13

0

0

0



L-C-PRÄZISIONSMESSBRÜCKE · TYPE LCB · BN 620 · FNr.

isierung

(-)

Schreiten!

6

3

Ausgang

C-NORMAL
1 μ F 1 mS

L-MESSUNG

U _{max}	I _{max}
1 mH	1 Ω
150 V	1,00 A
10 mH	10 Ω
190 V	0,50 A
100 mH	100 Ω
190 V	0,30 A
1 H	1 k Ω
225 V	0,15 A
10 H	10 k Ω
250 V	0,10 A
100 H	100 k Ω
250 V	0,03 A
1000 H	1 M Ω
250 V	0,01 A
L	r

C-MESSUNG

1000 μ F	1 S
100 μ F	100 mS
10 μ F	10 mS
1 μ F	1 mS

C

G

Bereich-
Endwerte

0

10

5

0

19

14

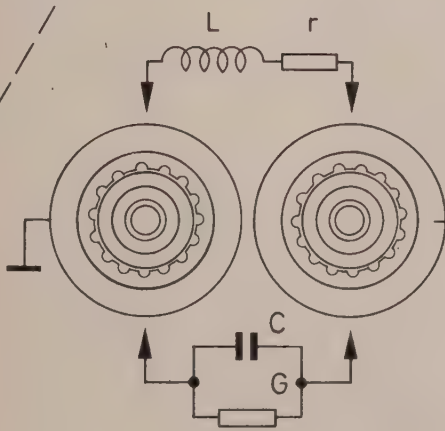
m Ω

12

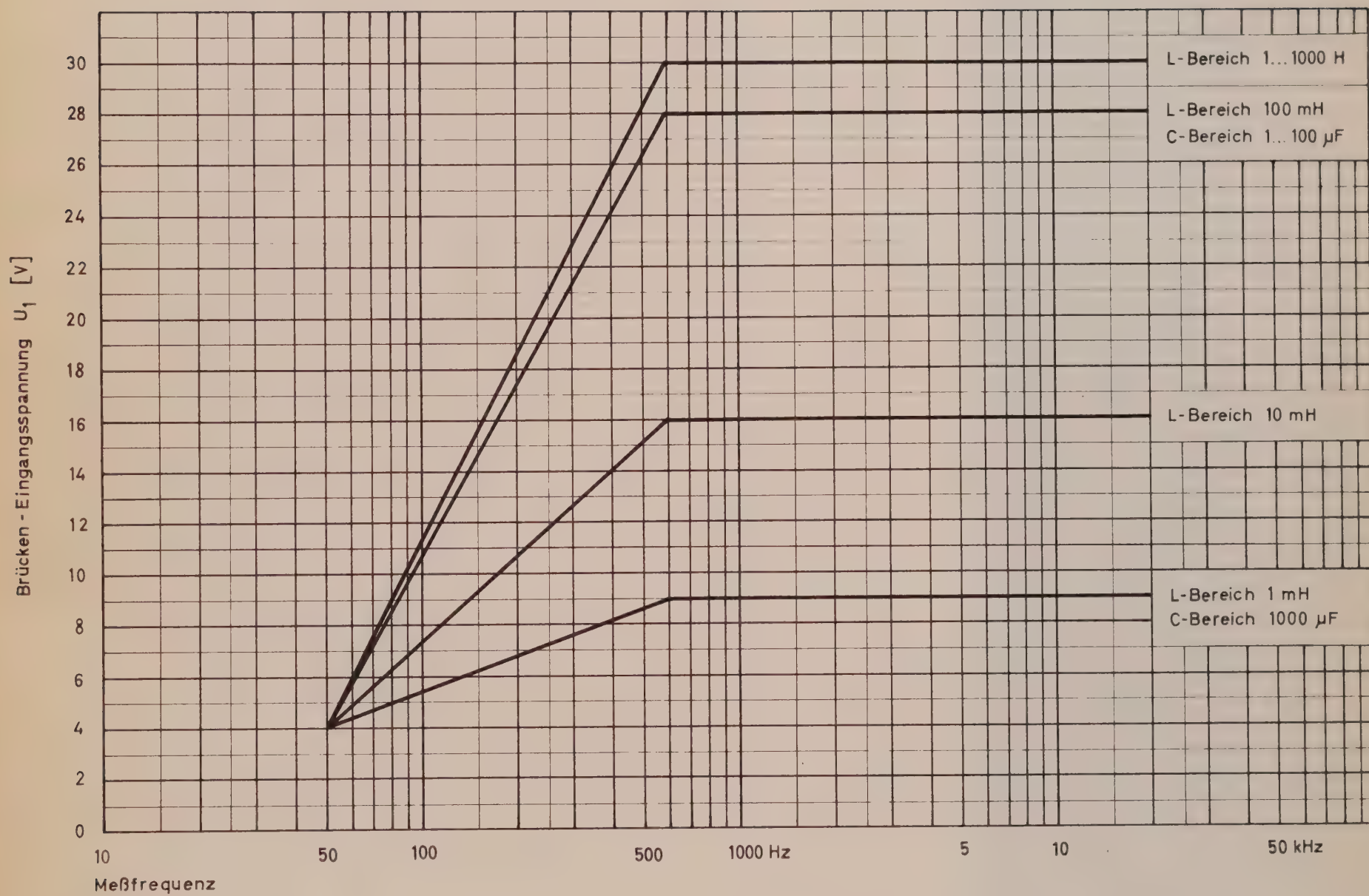
11

15

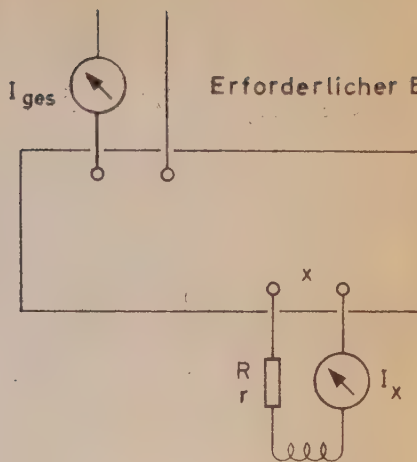
20



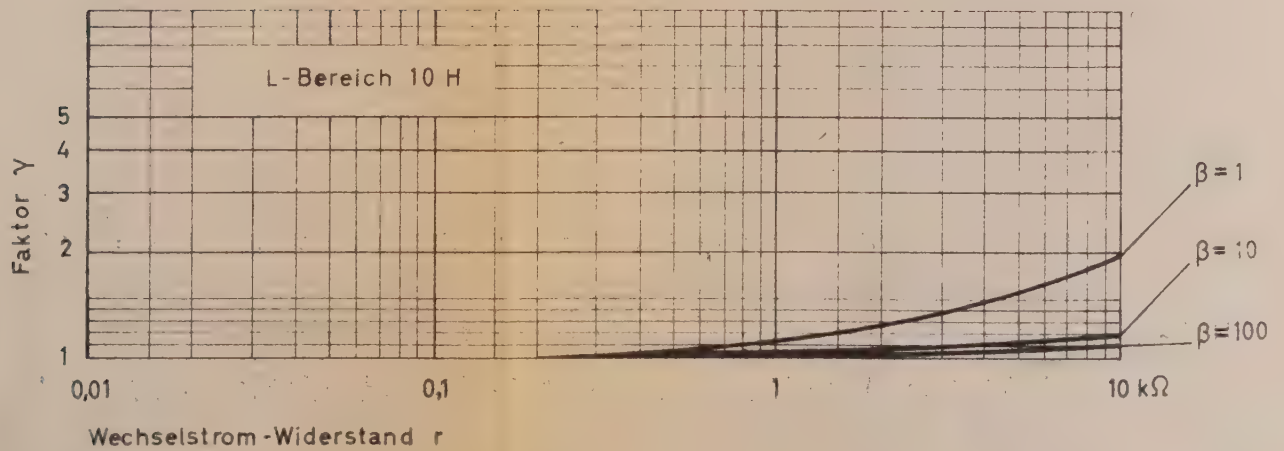
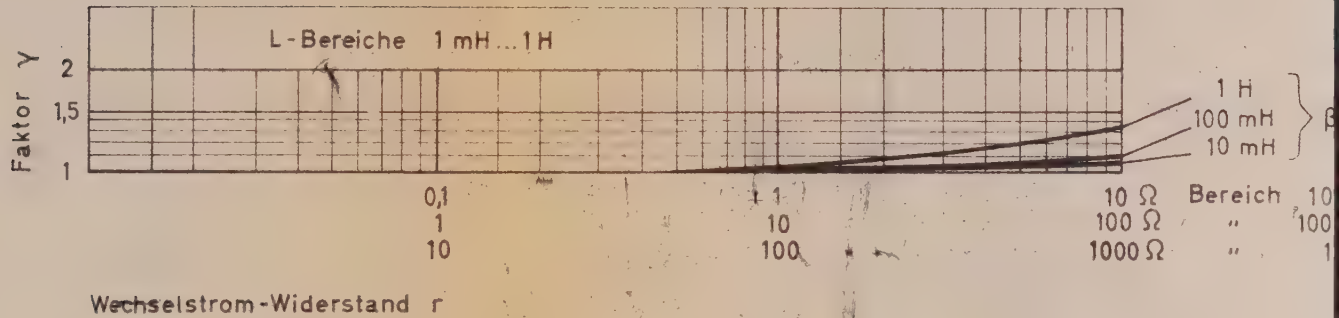
ROHDE & SCHWARZ · MÜNCHEN

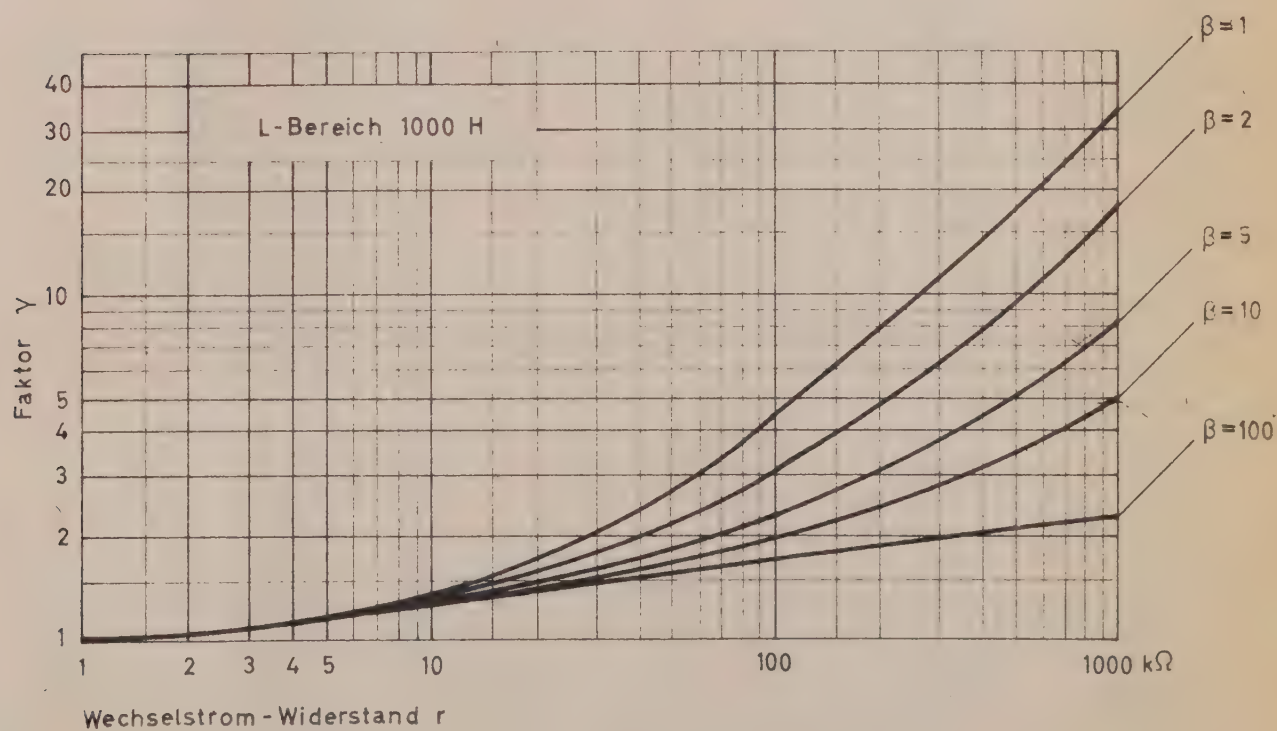
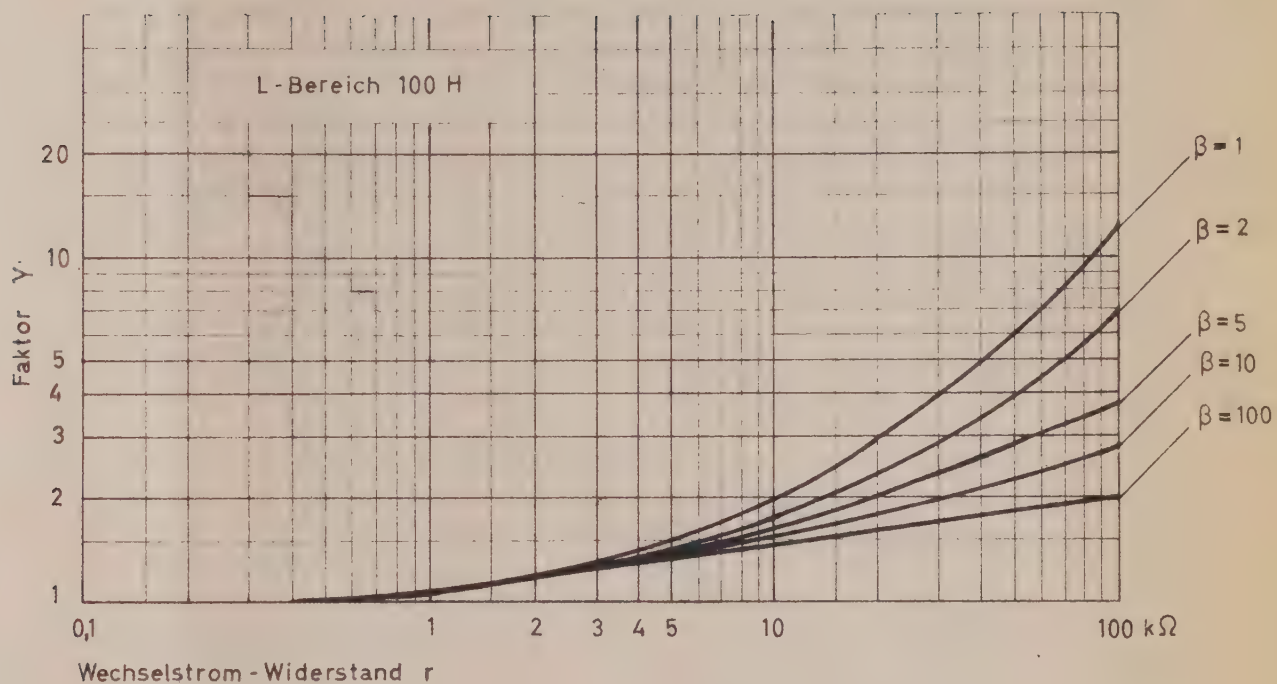


Maximal zulässige
Brücken - Eingangsspannung



$$\beta = \frac{\text{Wechselstromwiderstand } r}{\text{Gleichstromwiderstand } R}$$





Stromverhältnisse bei Gleichstrom-Vormagnetisierung
des Meßobjektes

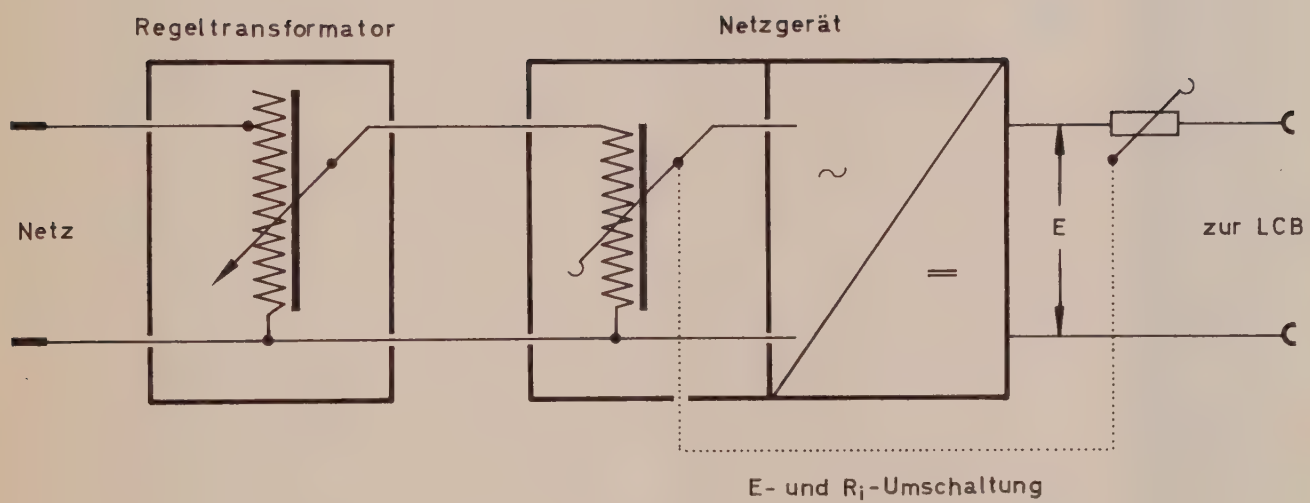
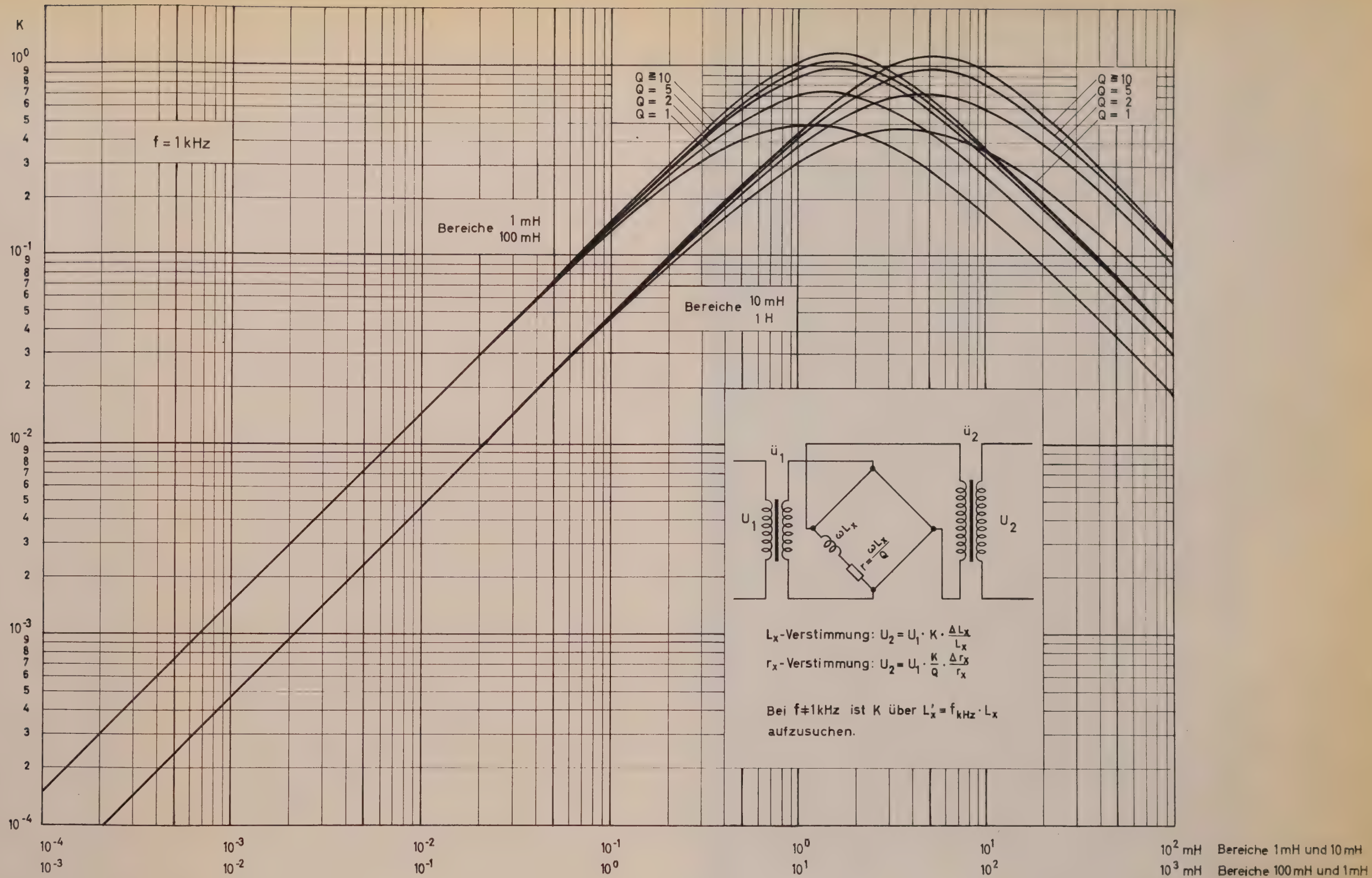
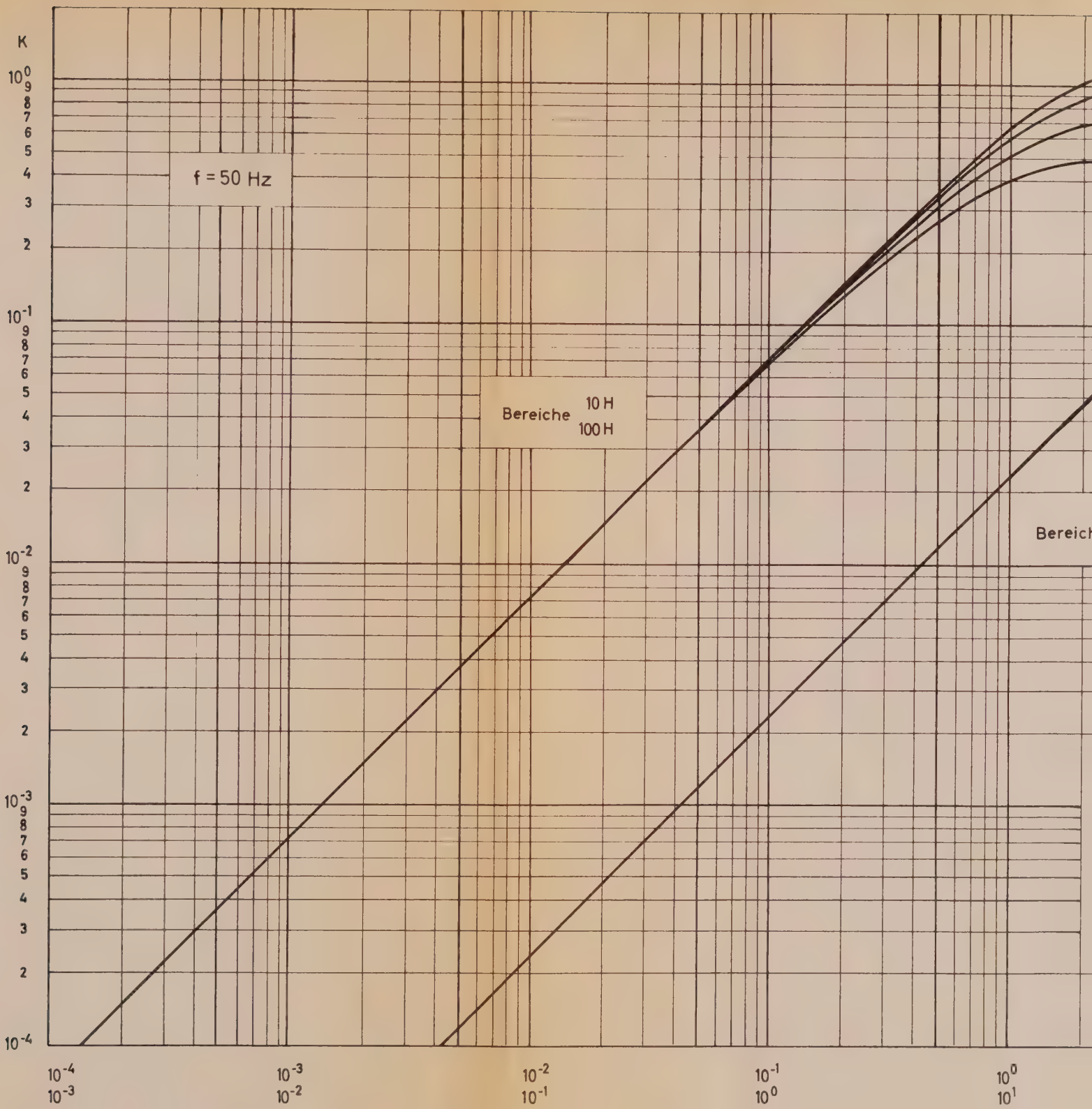
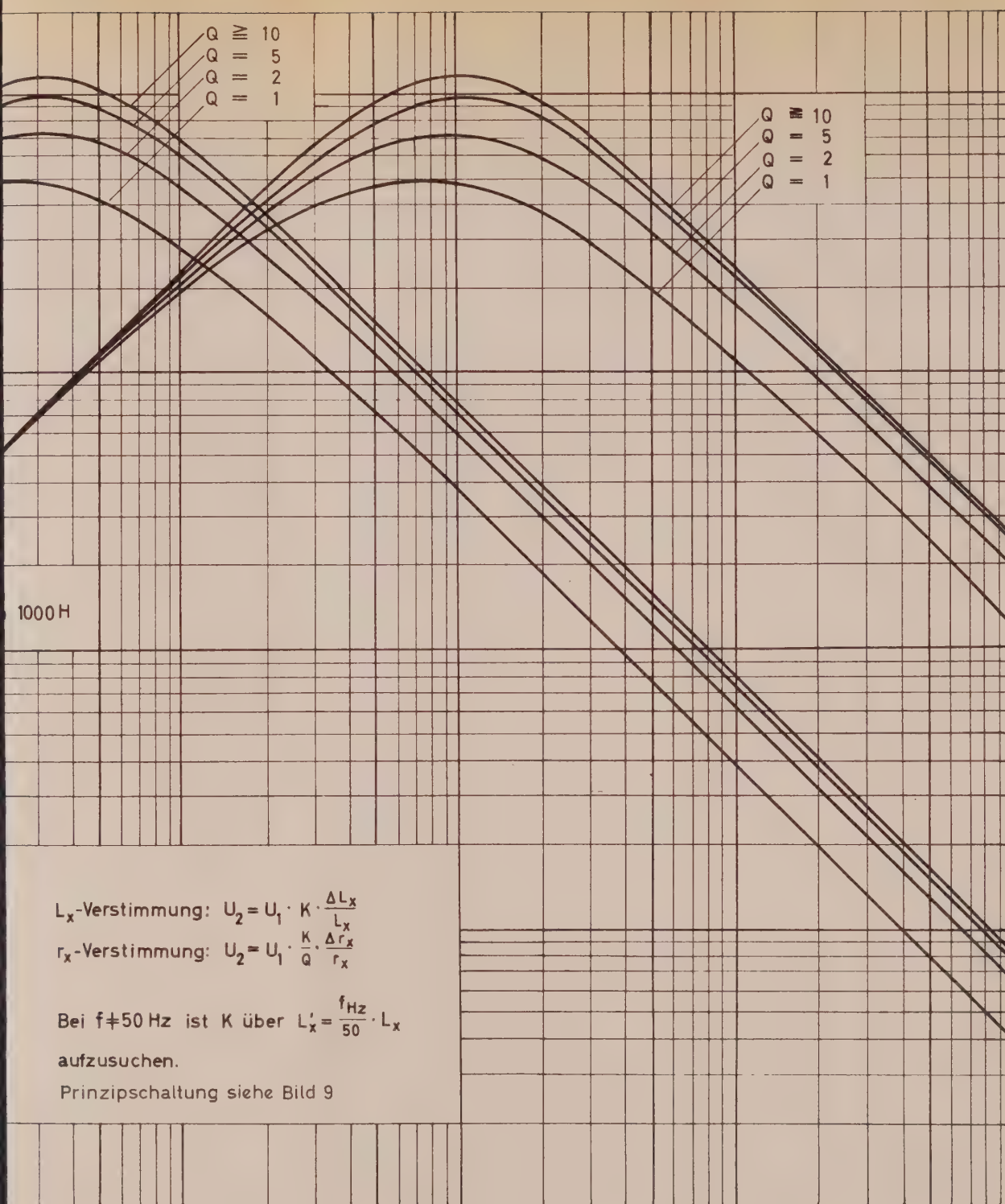


Bild 8



Nomogramm zur Ermittlung
der Brückenausgangsspannung
(1 kHz)





10^1
 10^2

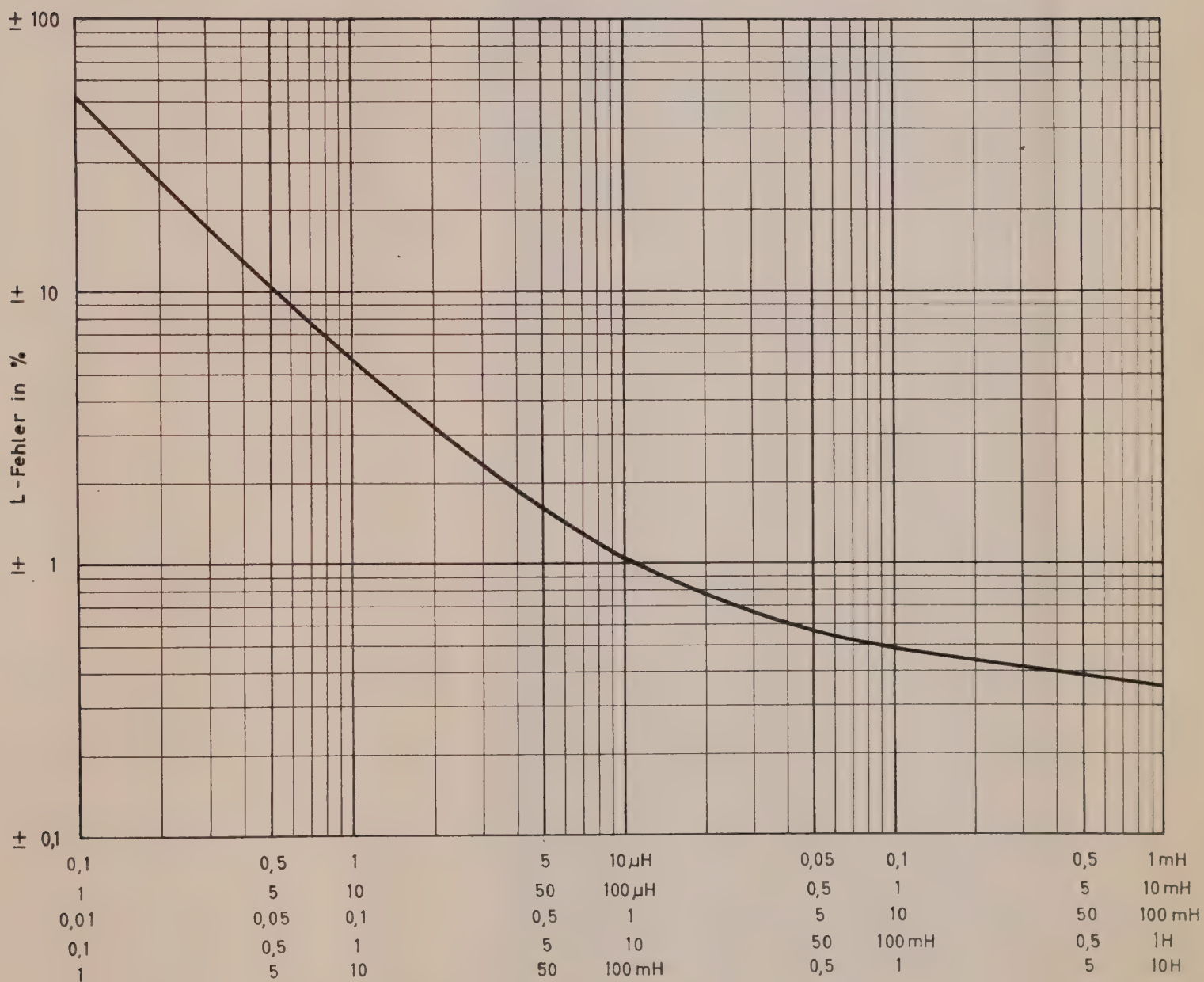
10^2
 10^3

10^3
 10^4

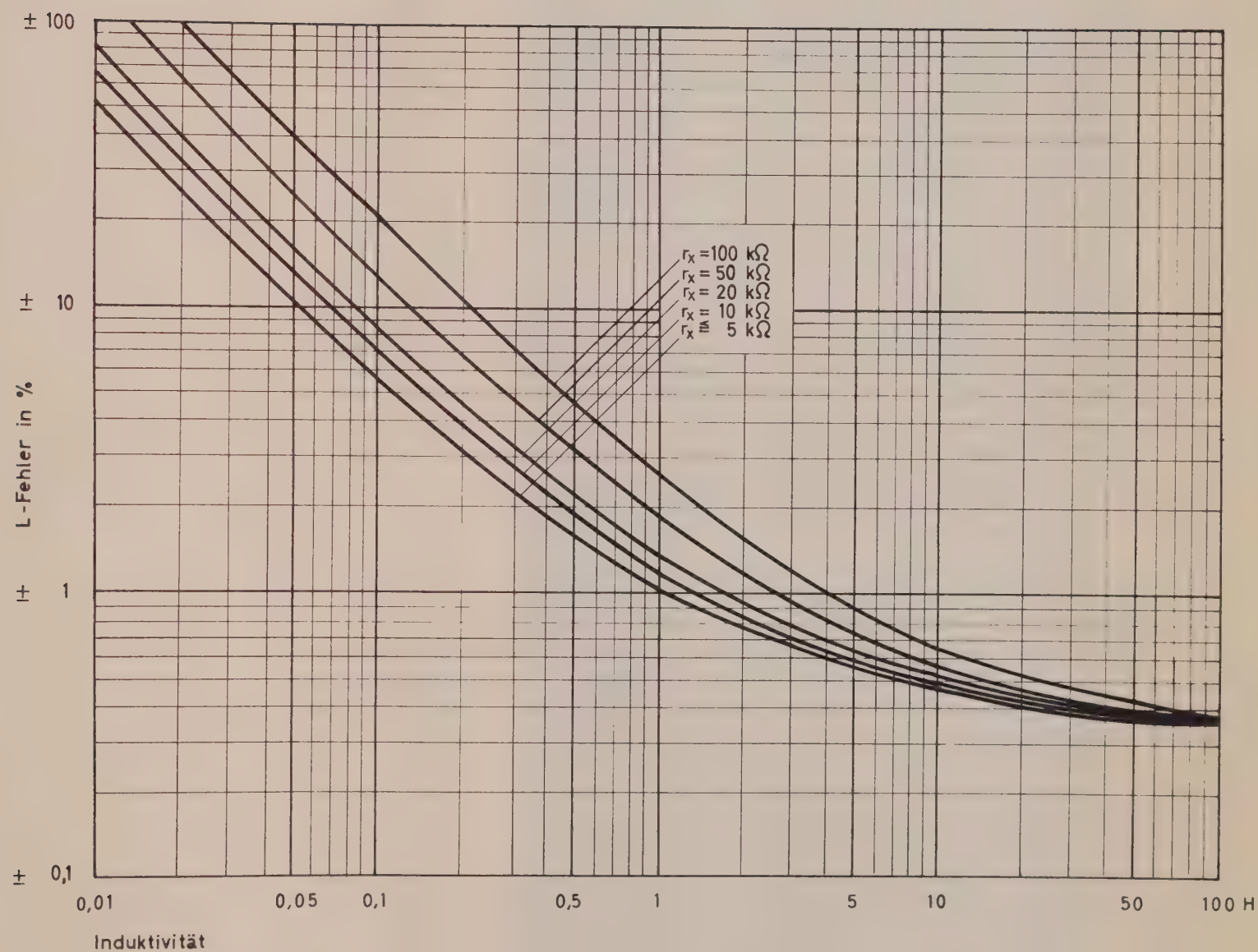
10^4
 10^5

Bereiche 10 H und 1000 H
Bereich 100 H

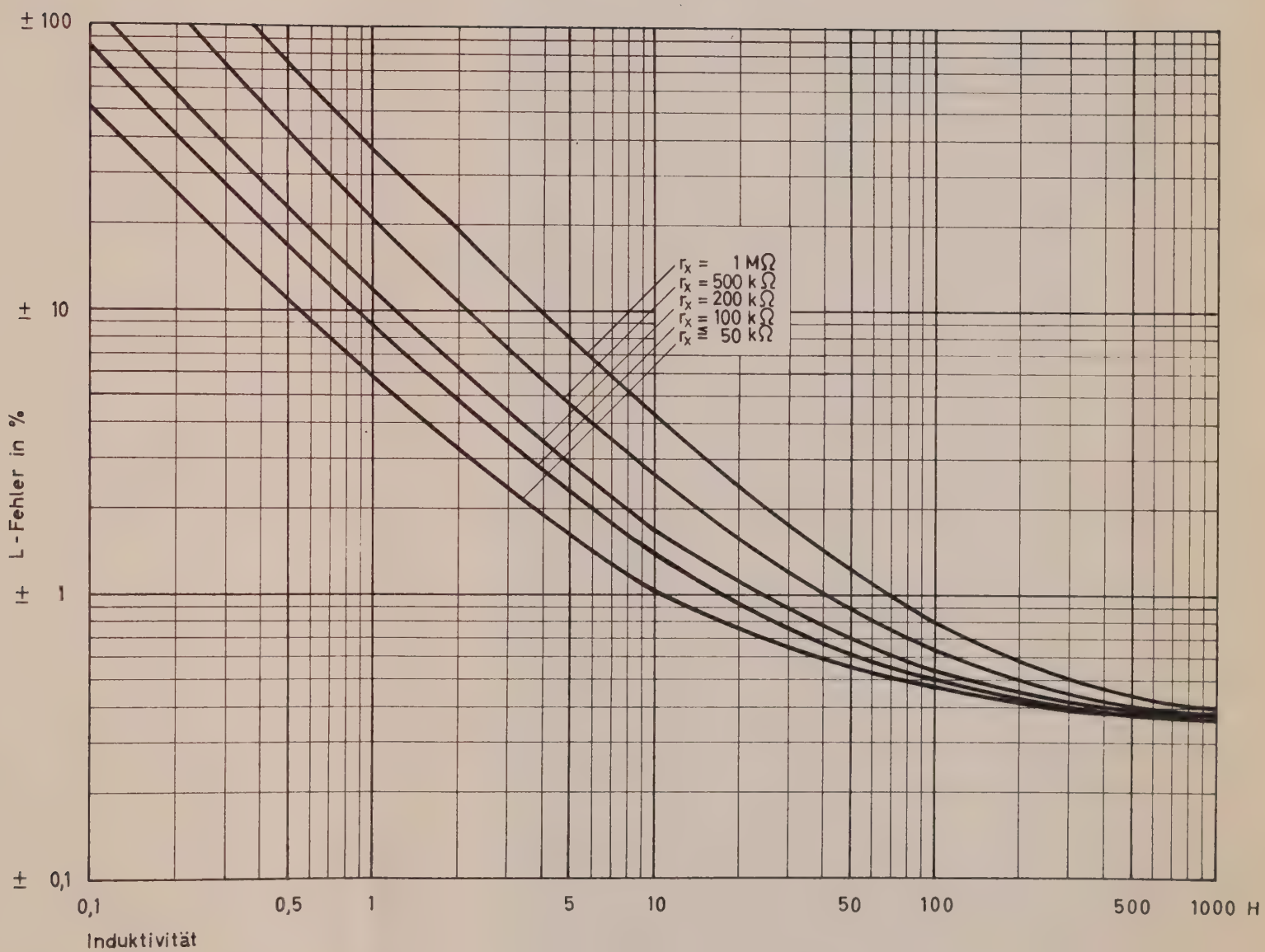
Nomogramm zur Ermittlung
der Brückenausgangsspannung
(50 Hz)



L-Fehler in den Bereichen 1mH...10H
 Temperaturbereich +10°... +30° C
 Kurve gültig für alle r-Werte



L-Fehler im Bereich 100 H
Temperaturbereich +10°...+30° C



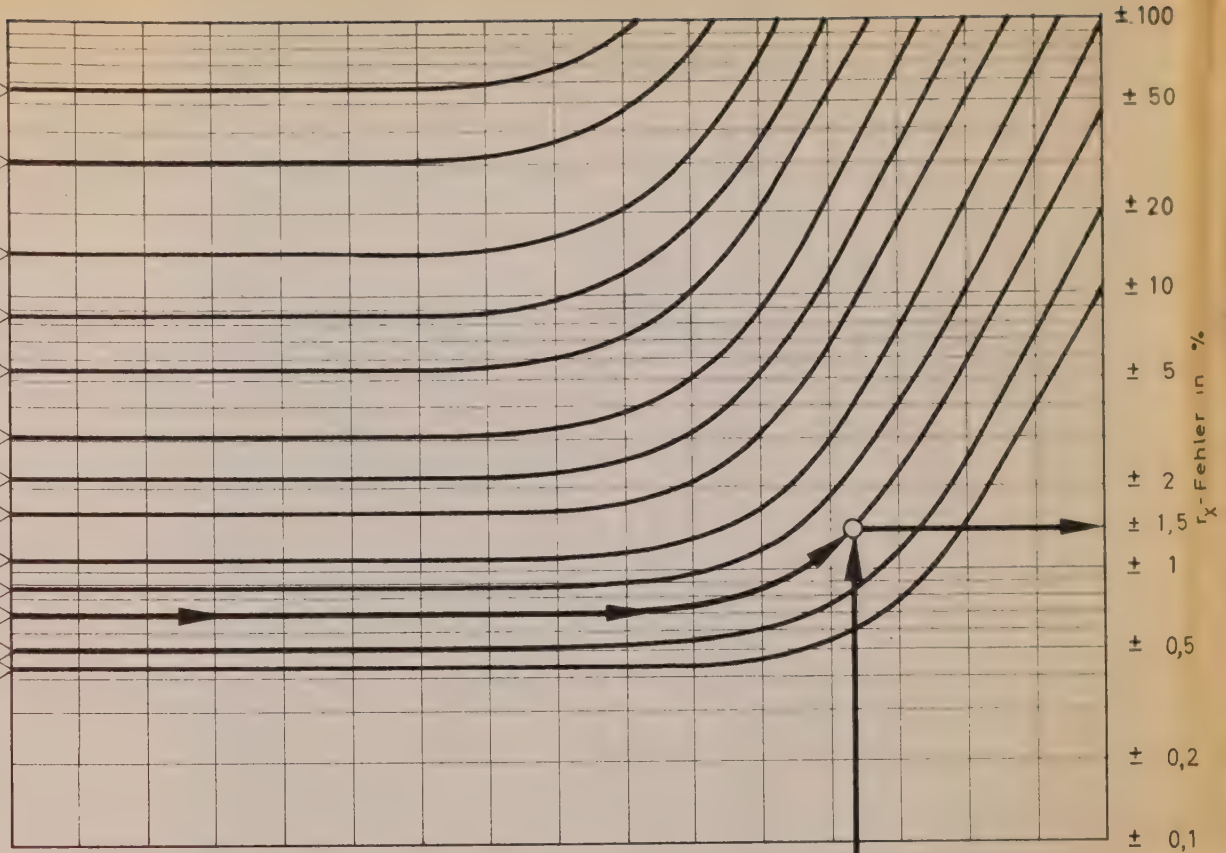
L-Fehler im Bereich 1000 H
 Temperaturbereich +10°...+30° C

Meßbeispiel:
 $L_x \approx 3\text{mH}$
 $r_x \approx 2\Omega$
 $f = 5\text{kHz}$
 $r_x\text{-Fehler} = \pm 1,5\%$

r_x -Parameter, gültig jeweils für eine Kurve

L - Bereiche

1 mH	10 mH	100 mH
0,1 mΩ	1 mΩ	10 mΩ
0,2 mΩ	2 mΩ	20 mΩ
0,5 mΩ	5 mΩ	50 mΩ
1 mΩ	10 mΩ	100 mΩ
2 mΩ	20 mΩ	200 mΩ
5 mΩ	50 mΩ	500 mΩ
10 mΩ	100 mΩ	1 Ω
20 mΩ	200 mΩ	2 Ω
50 mΩ	500 mΩ	5 Ω
100 mΩ	1 Ω	10 Ω
200 mΩ	2 Ω	20 Ω
500 mΩ	5 Ω	50 Ω
1 Ω	10 Ω	100 Ω

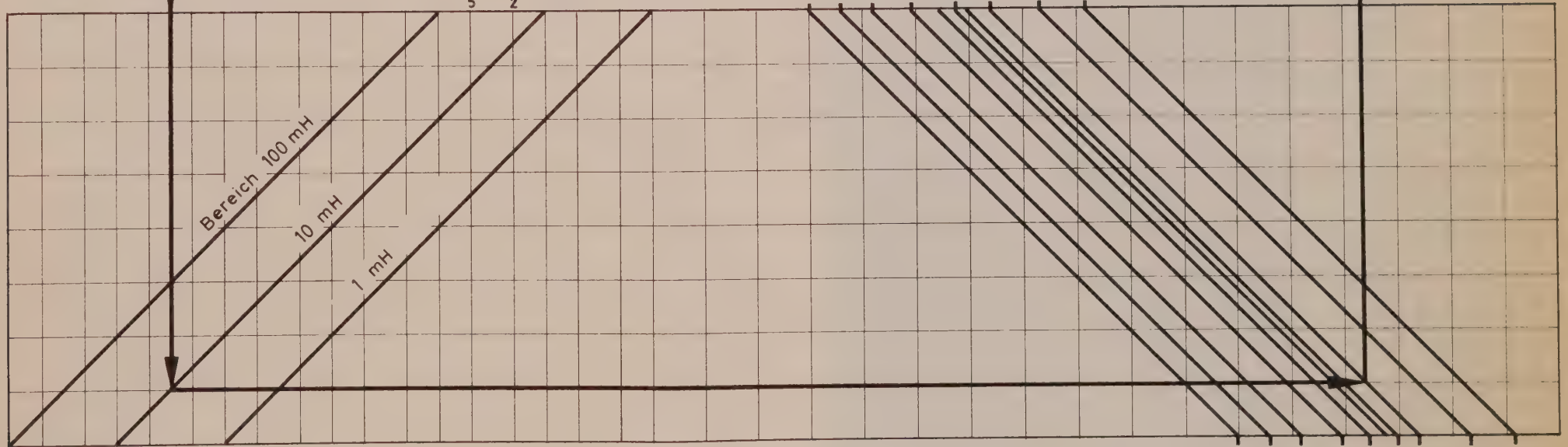


L_x
 100 mH 10 mH 1 mH 100 μH 10 μH 5 μH 2 μH 1 μH 0,1 μH

L - Bereich 100 mH

Hz 50 100 200 530 2500
 kHz 4,95 4,9 4,8 4,5 5,8
 kHz 5,05 5,1 5,2 5,5 6,3 6,8

f - Parameter

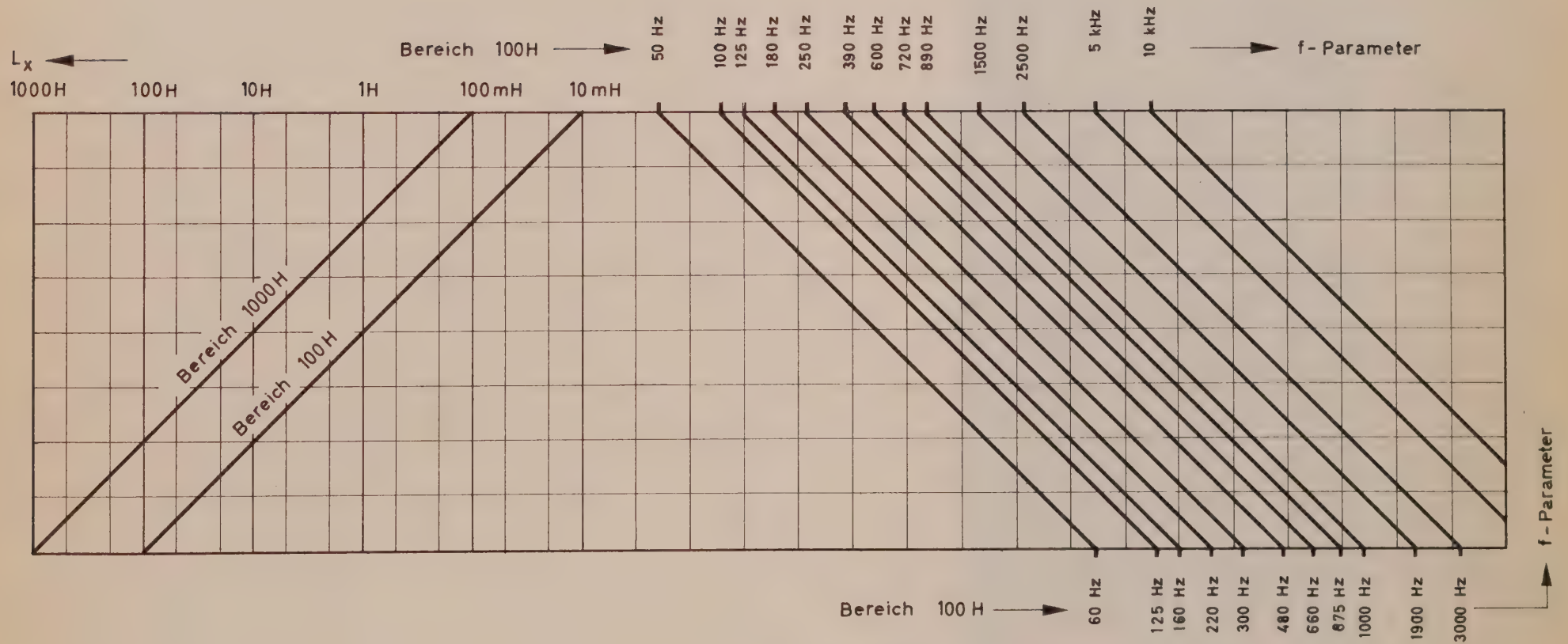
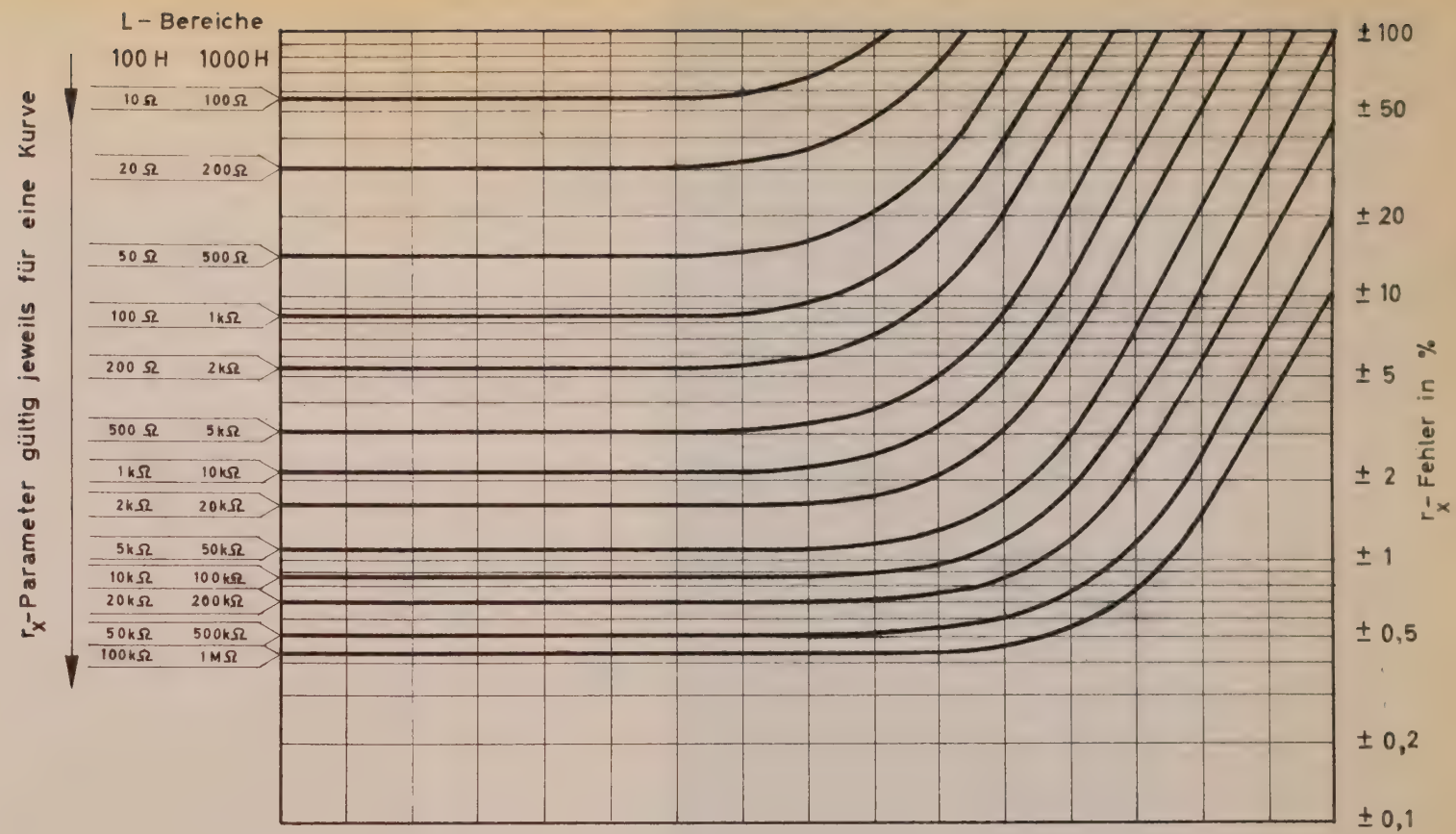


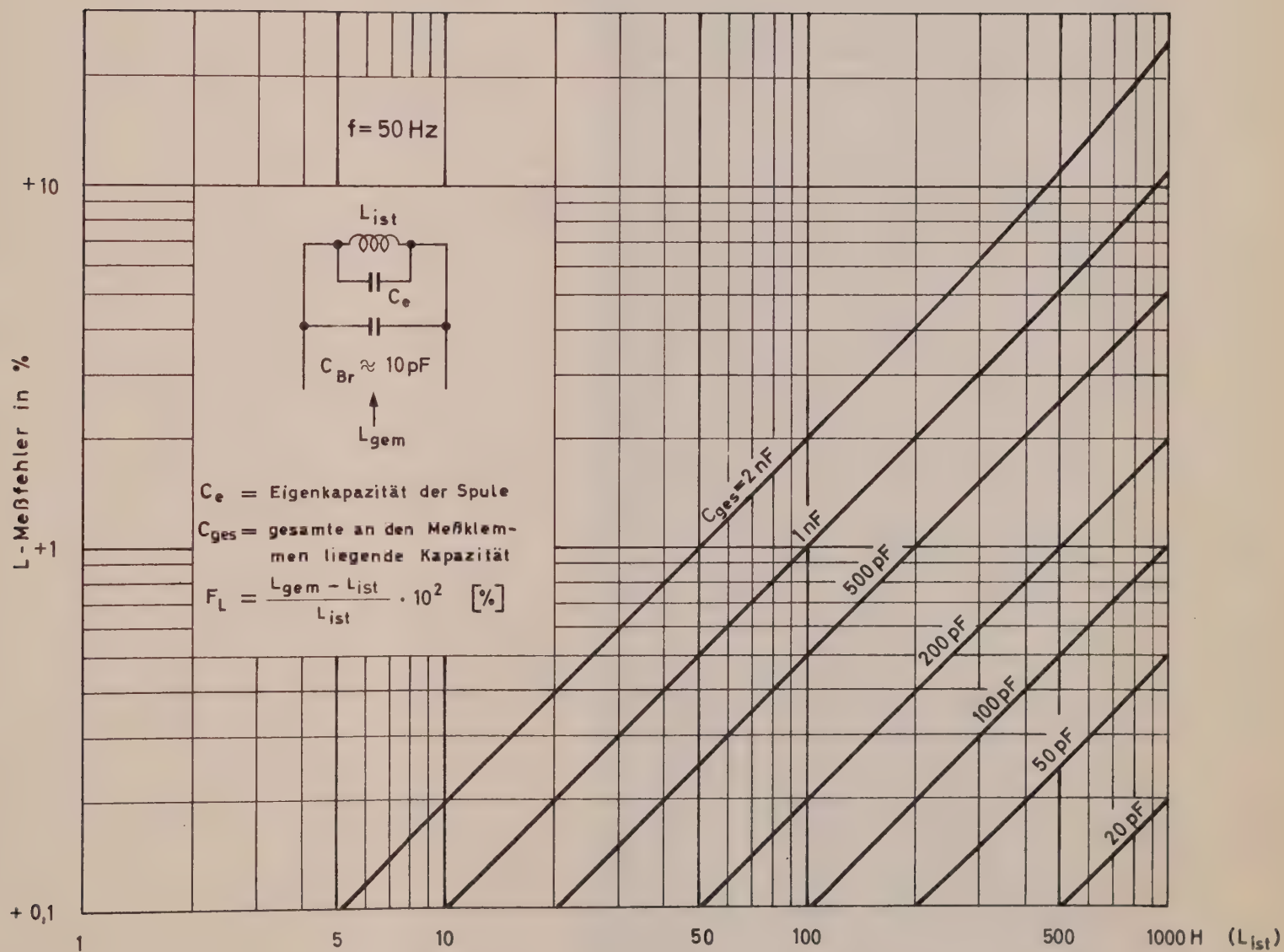
L-Bereiche 1mH und 10mH

Hz 50 100 200 500 1 k 2 k 5 k
 kHz 9,95 9,9 9,8 9,5 9,0 8
 kHz 10,05 10,1 10,2 10,5 11 12 15 20

f - Parameter

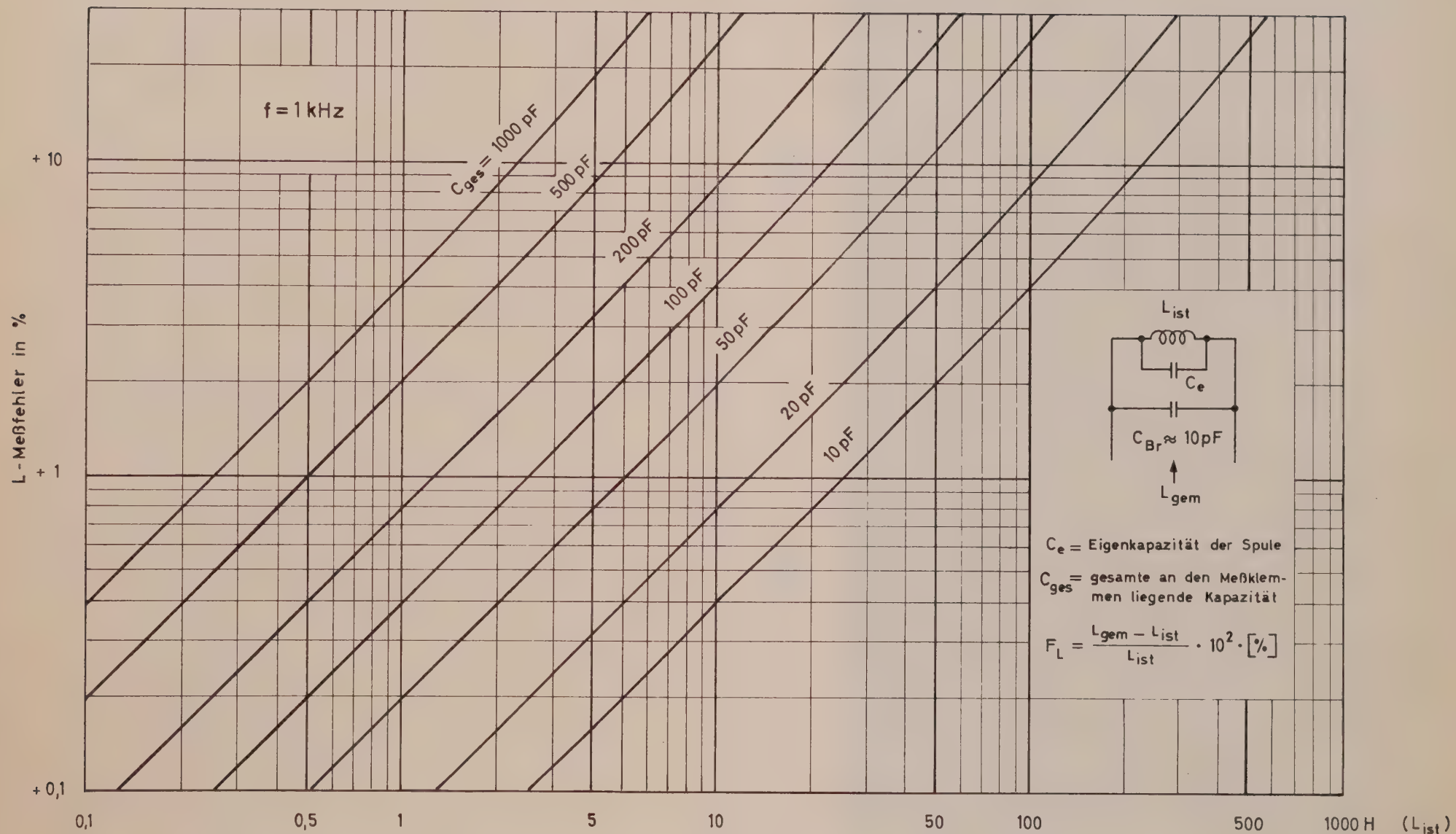
r_x - Meßfehler in den L - Bereichen 1mH ... 100 mH



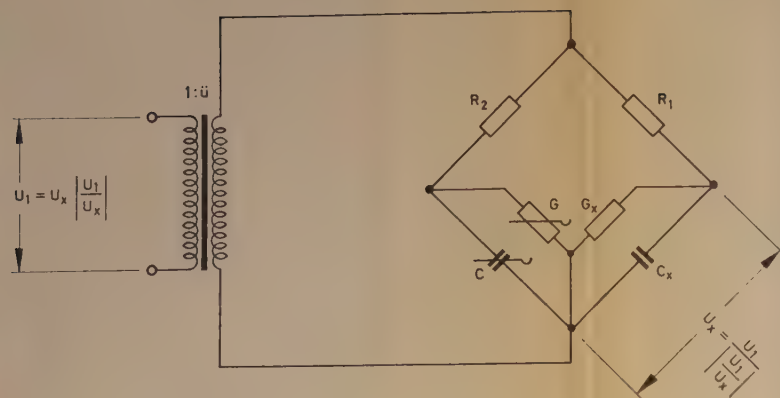


L-Meßfehler durch Parallelkapazität
 (50 Hz)





L-Meßfehler durch Parallelkapazität
(1 kHz)

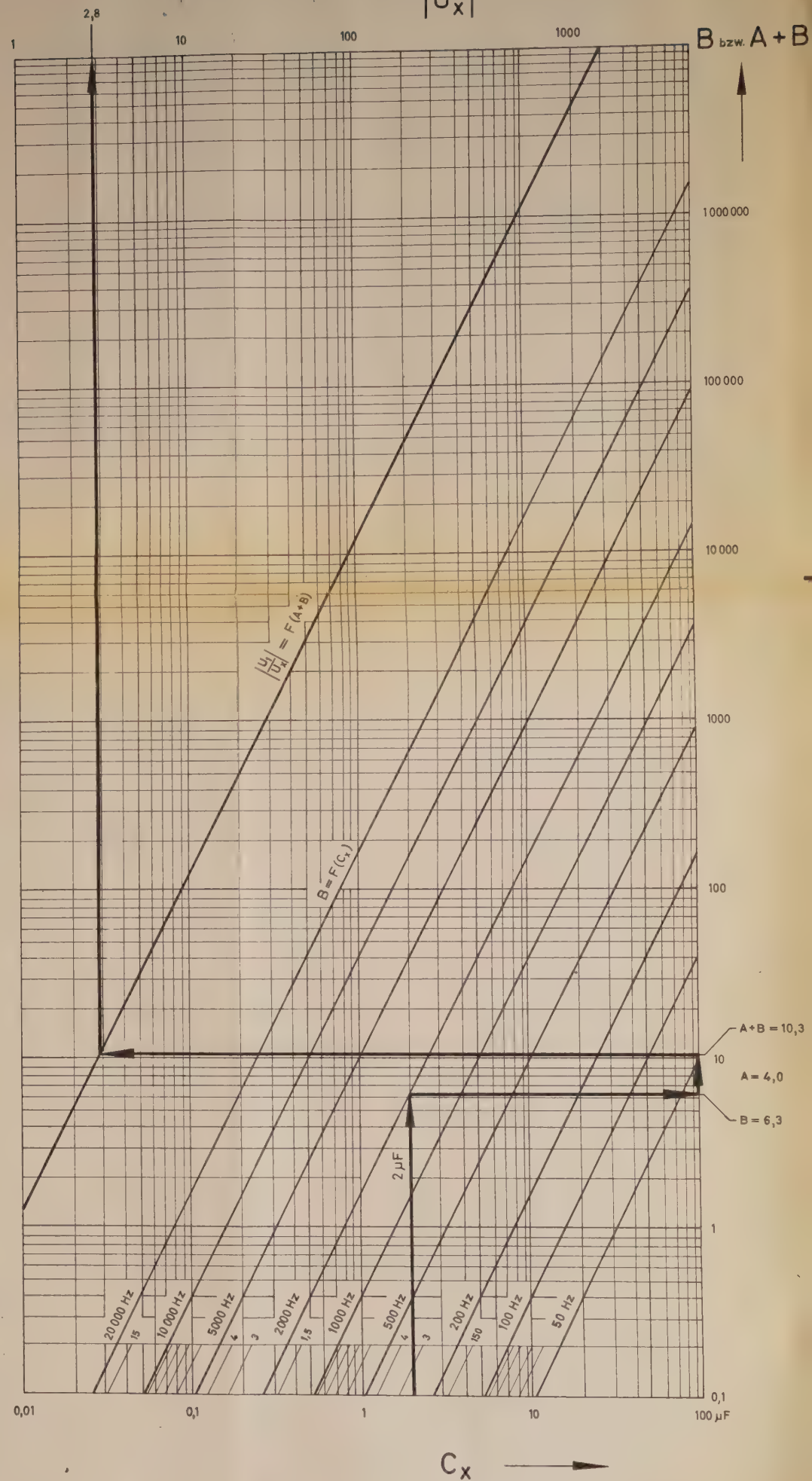
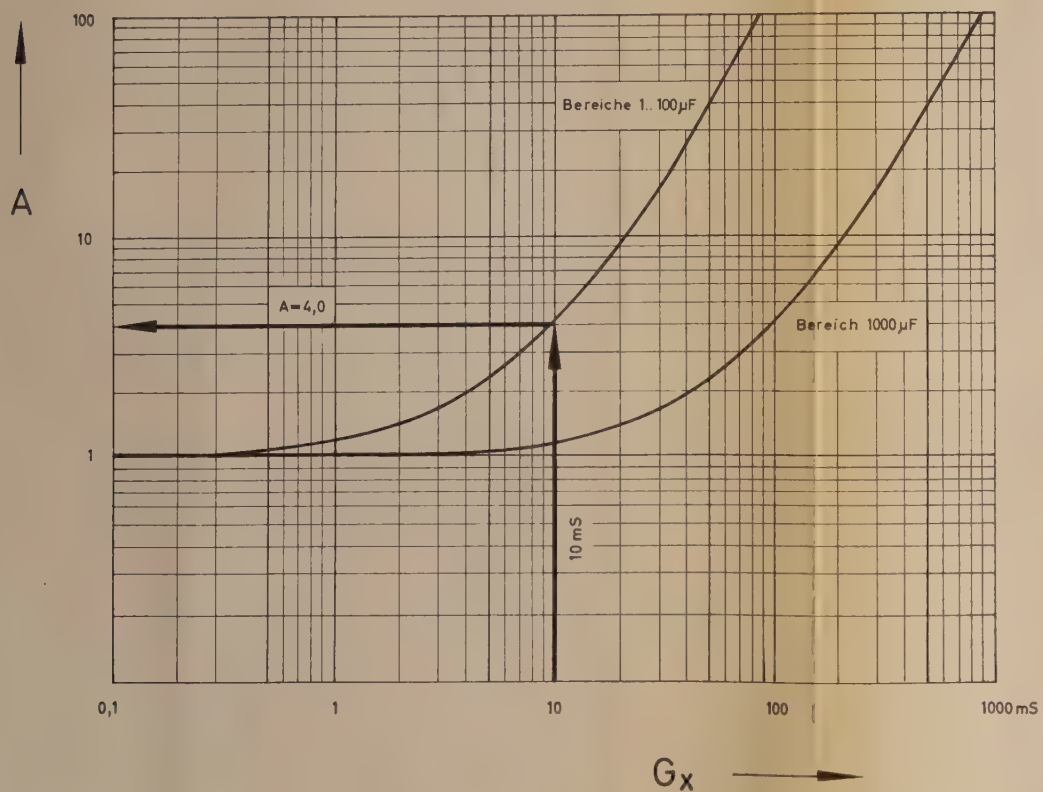


Gegeben: C_x, G_x, f, U_1 oder U_x

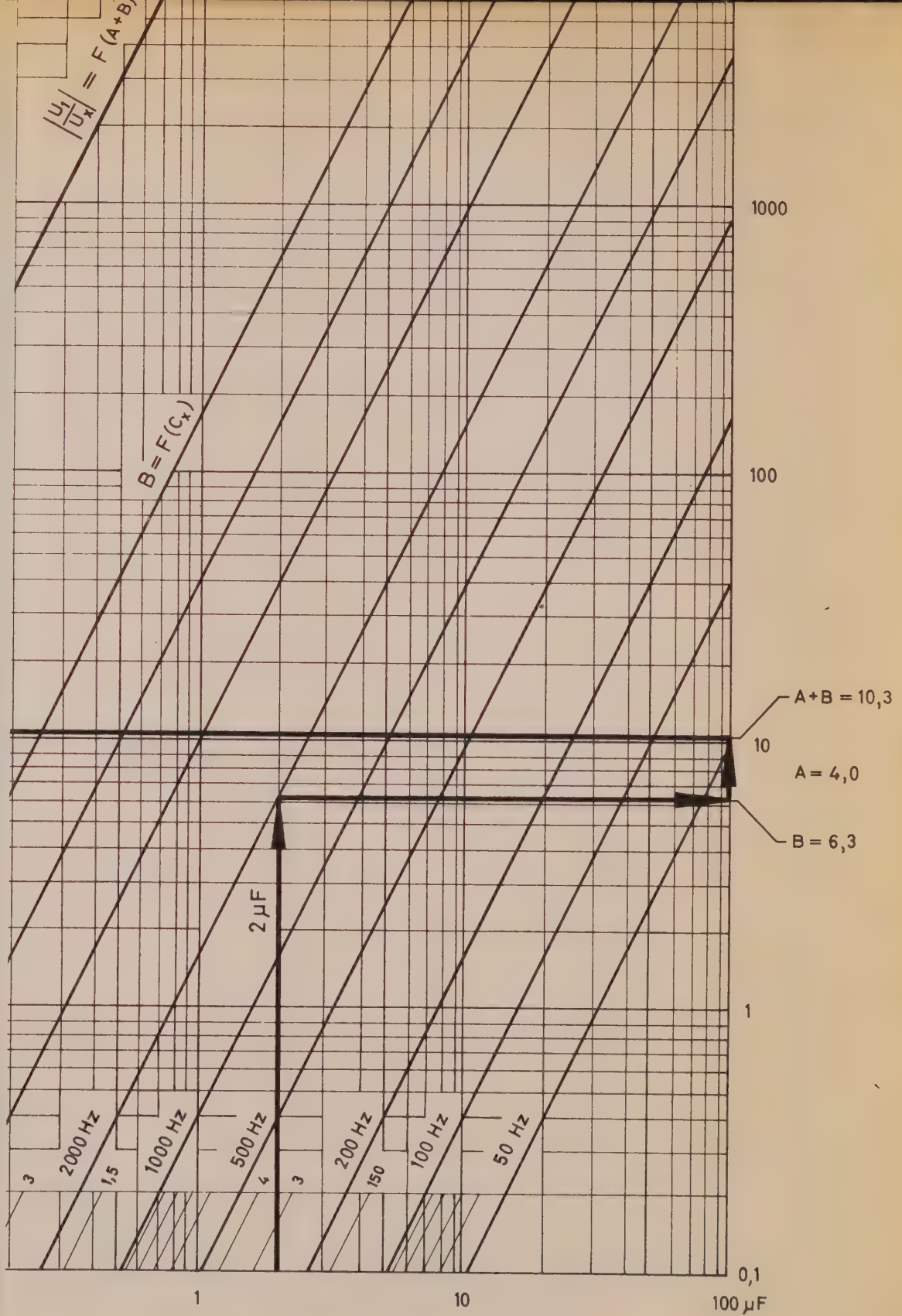
Gesucht: $\frac{U_1}{U_x}$

- unten { 1) entsprechend G_x und C-Bereich den Wert A ermitteln
2) entsprechend C_x und f den Wert B ermitteln
rechts { 3) die Werte A und B addieren
4) entsprechend dem Wert A+B oben U_1/U_x ablesen

Im Beispiel: $C_x = 2 \mu F$ | $A = 4,0$ | $\frac{U_1}{U_x} = 10,3$
 $G_x = 10 \text{ mS}$ | $B = 6,3$
 $f = 2000 \text{ Hz}$ | $A+B = 10,3$



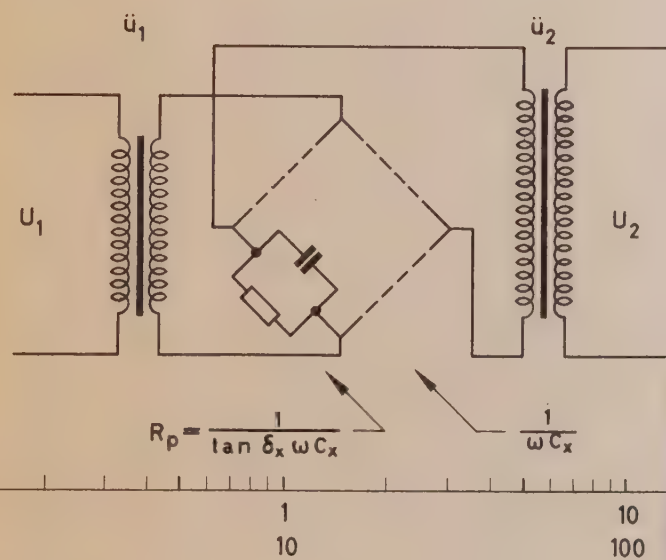
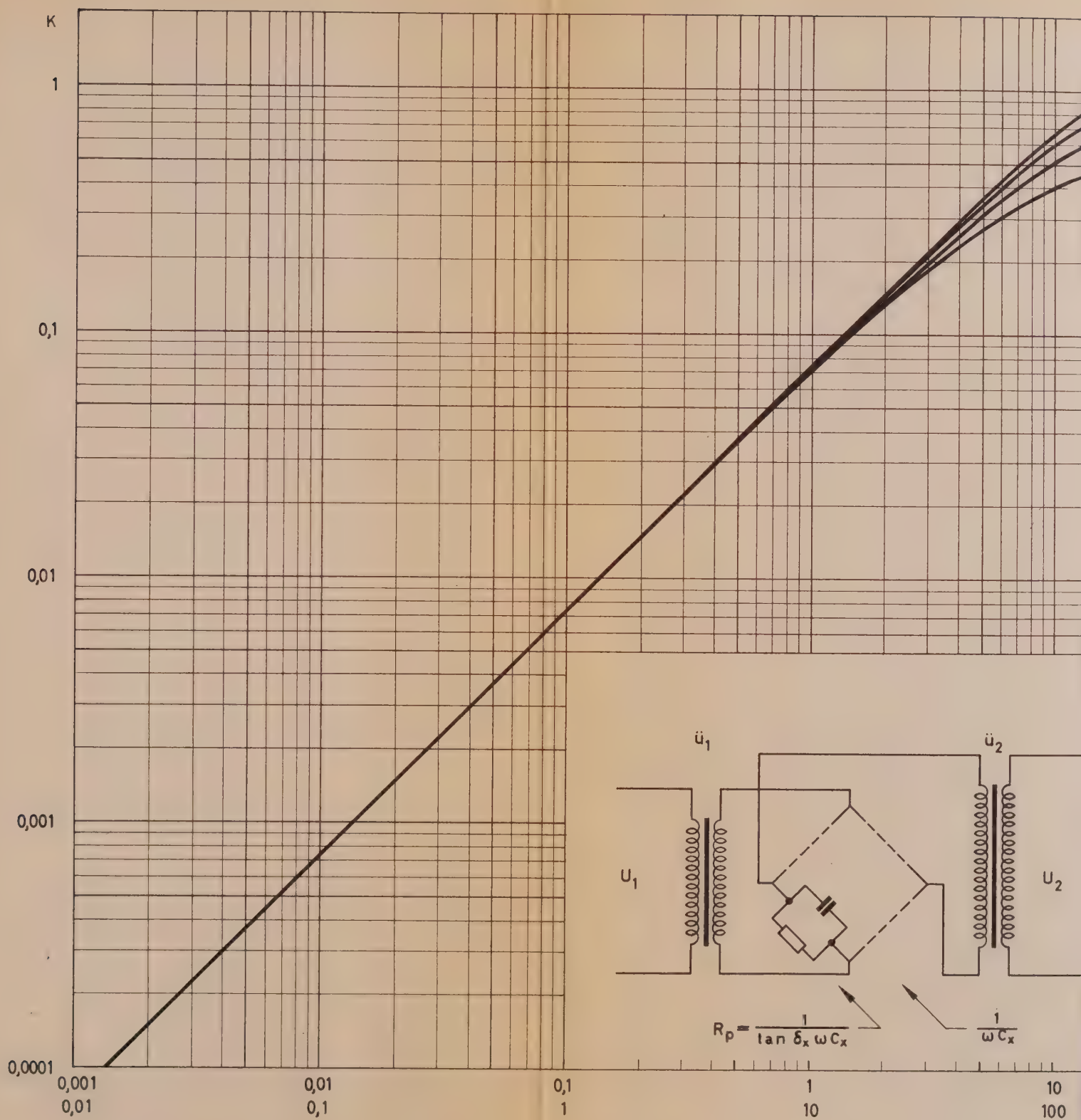
Nomogramm zum Ermitteln
der Brücken- bzw.
Meßobjektspannung

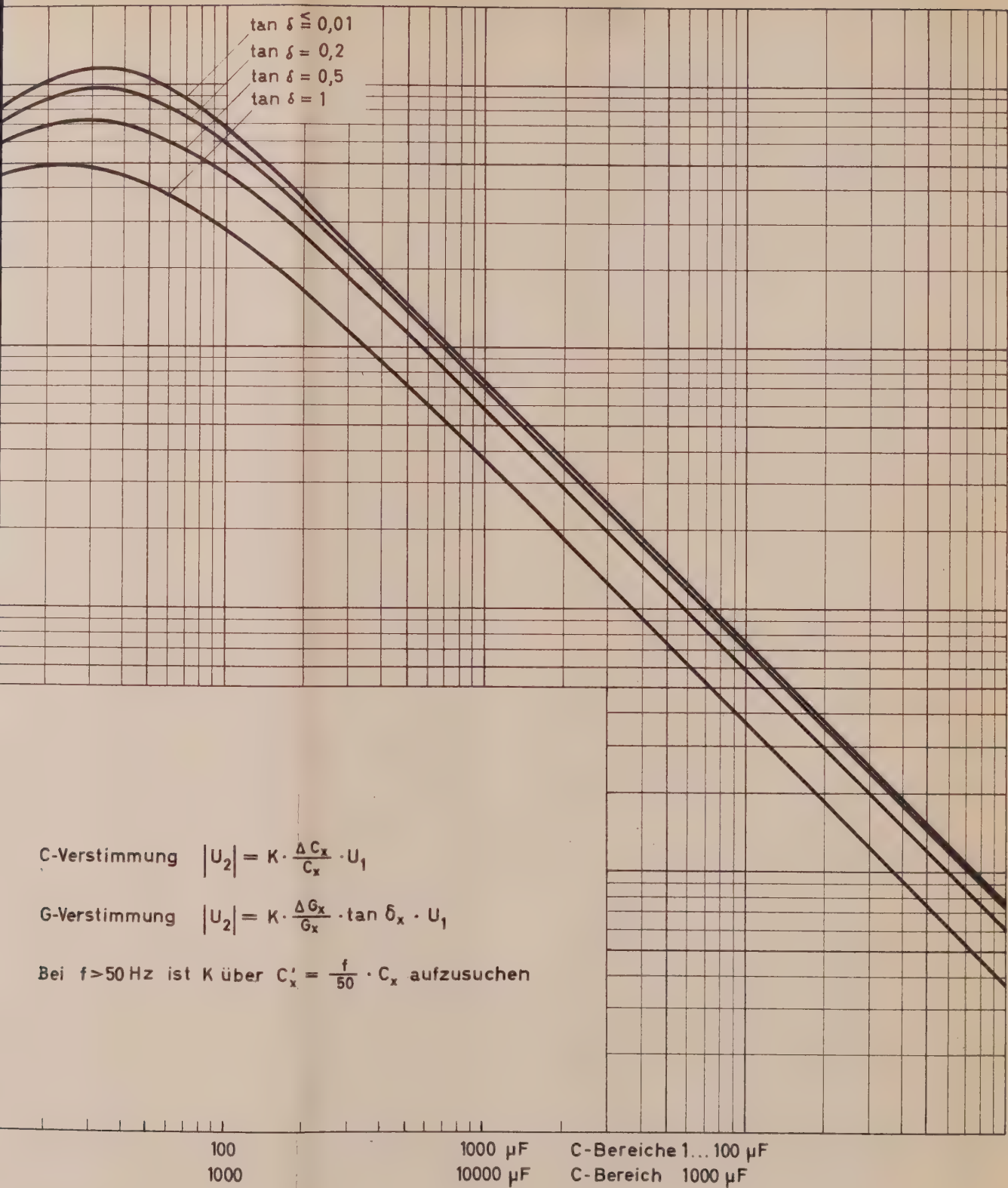


C_x →

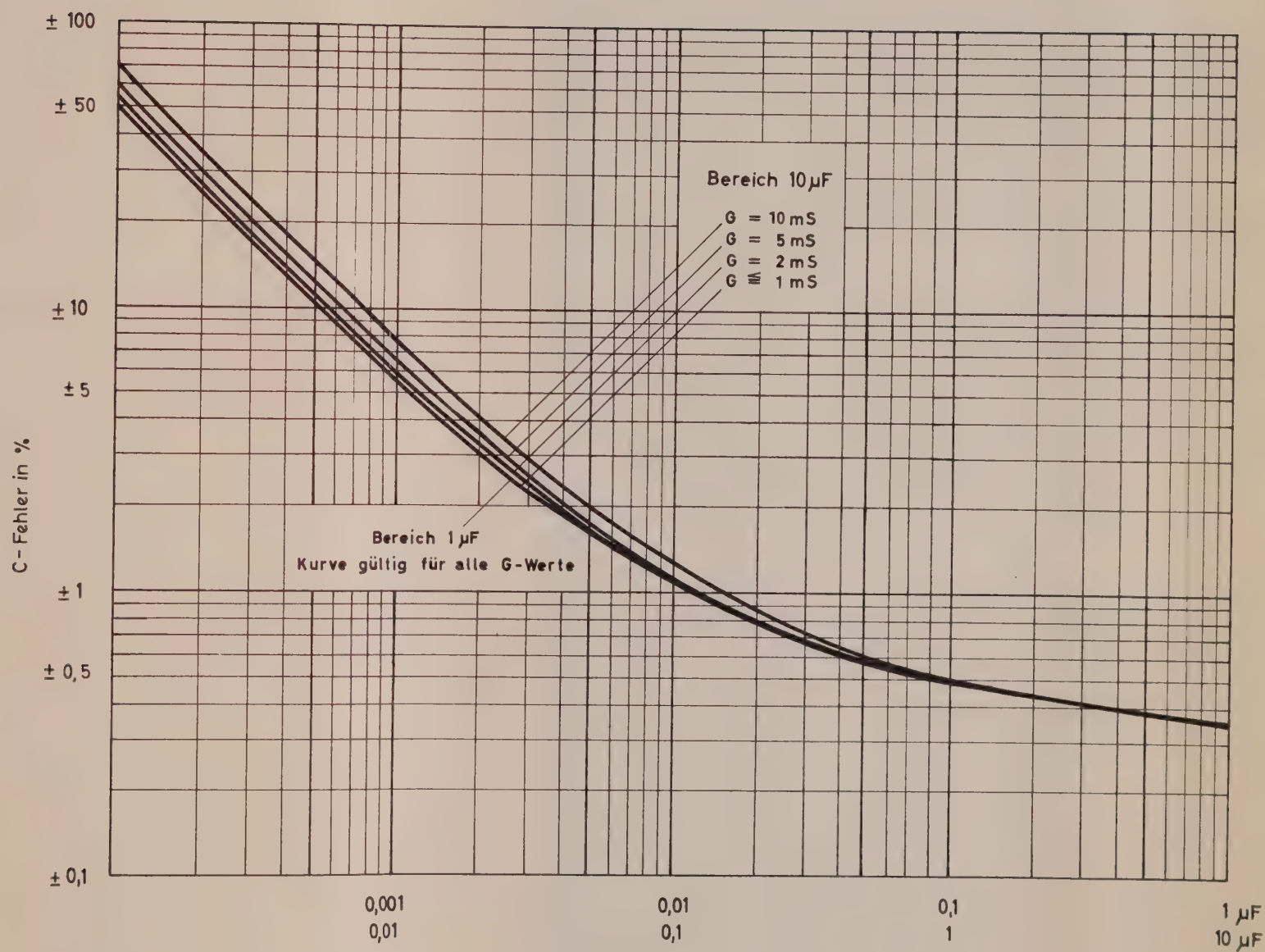
Nomogramm zum Ermitteln
der Brücken- bzw.
Meßobjektspannung

Bild 19

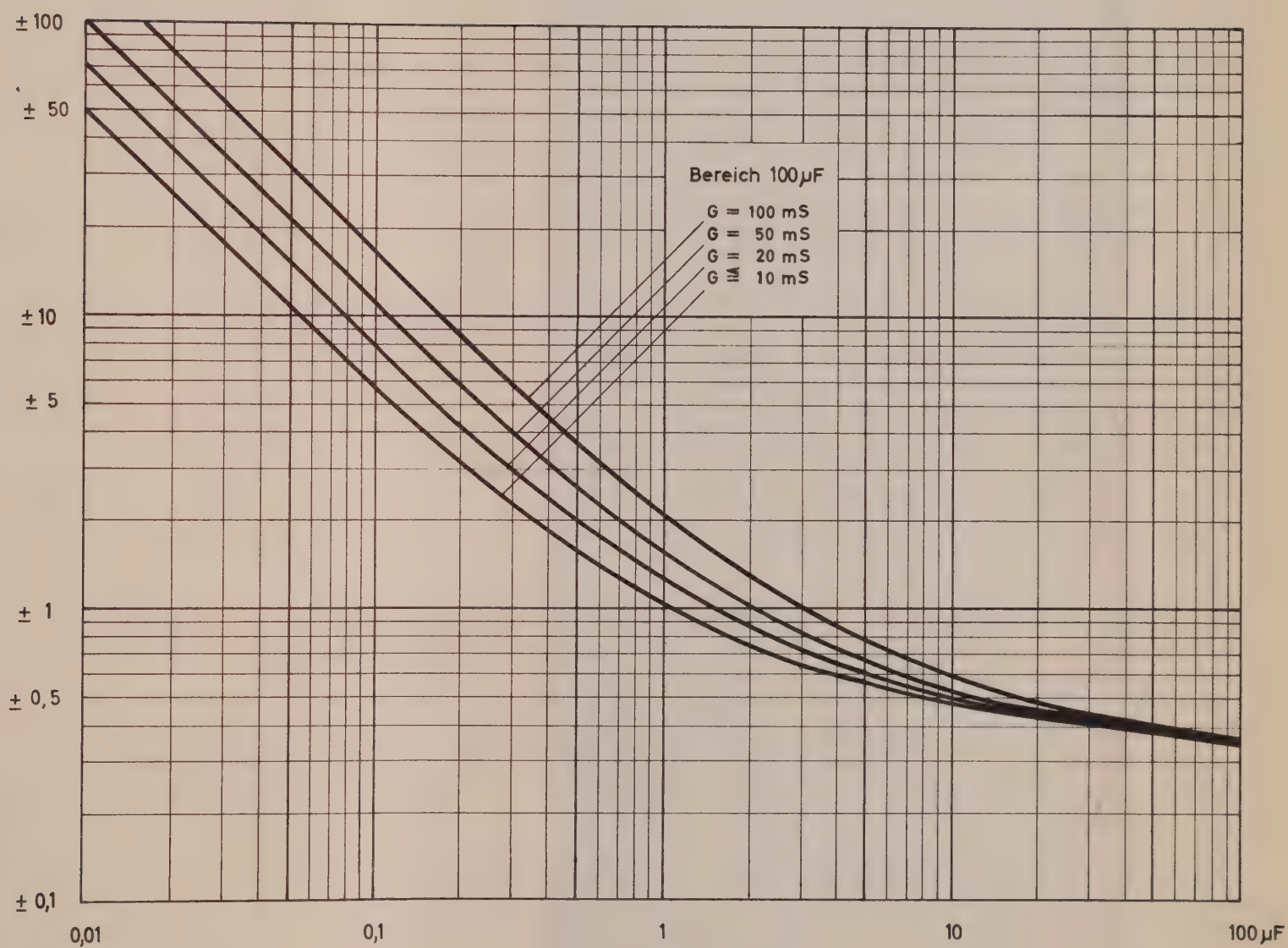




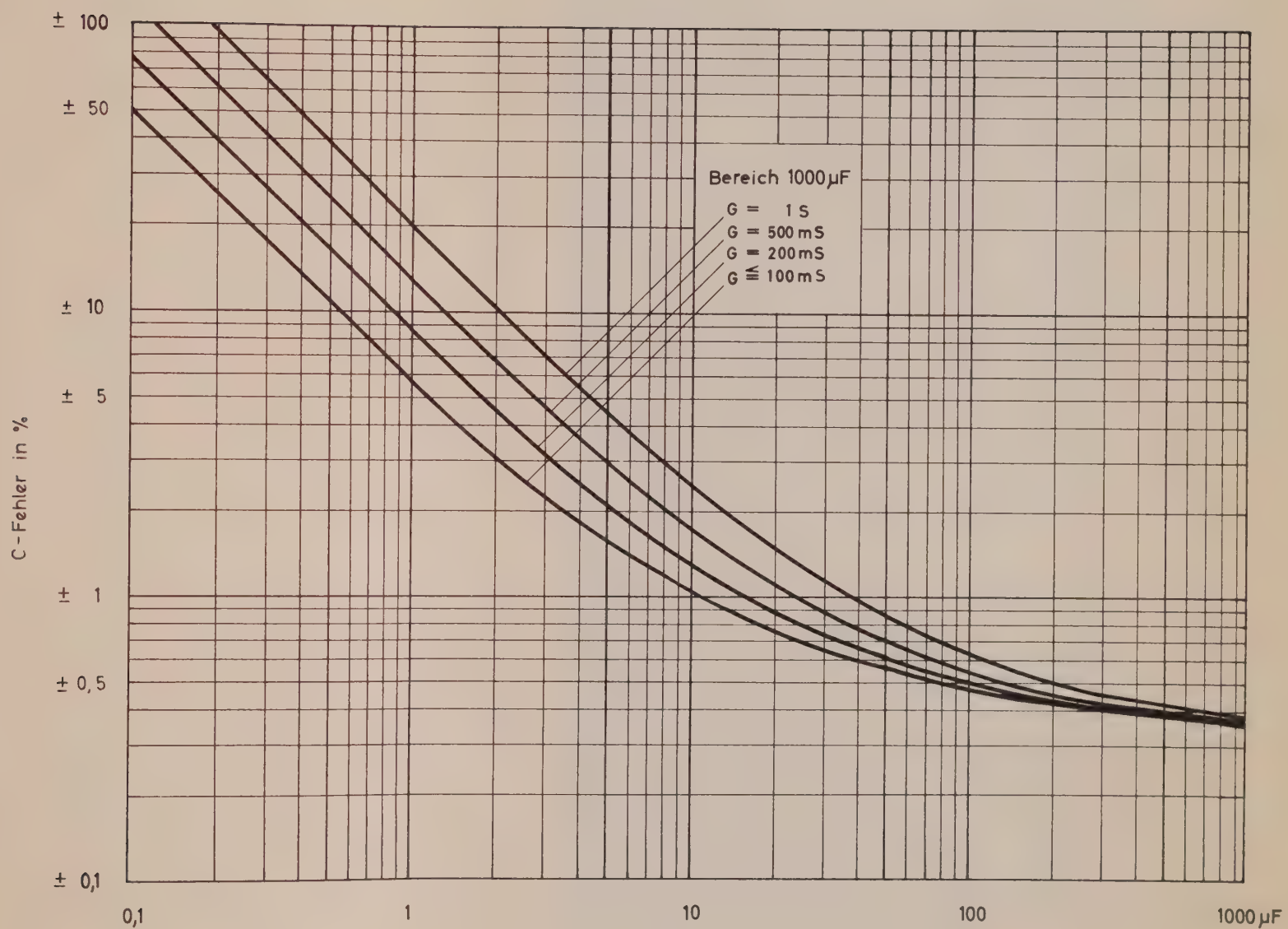
C-Bereich-Reizschwelle bei 50 Hz



C-Gesamtfehler in den Bereichen $1 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$
Temperaturbereich $+10^\circ \dots +30^\circ \text{C}$



C-Gesamtfehler im Bereich 100 μF
 Temperaturbereich +10°...+30°C

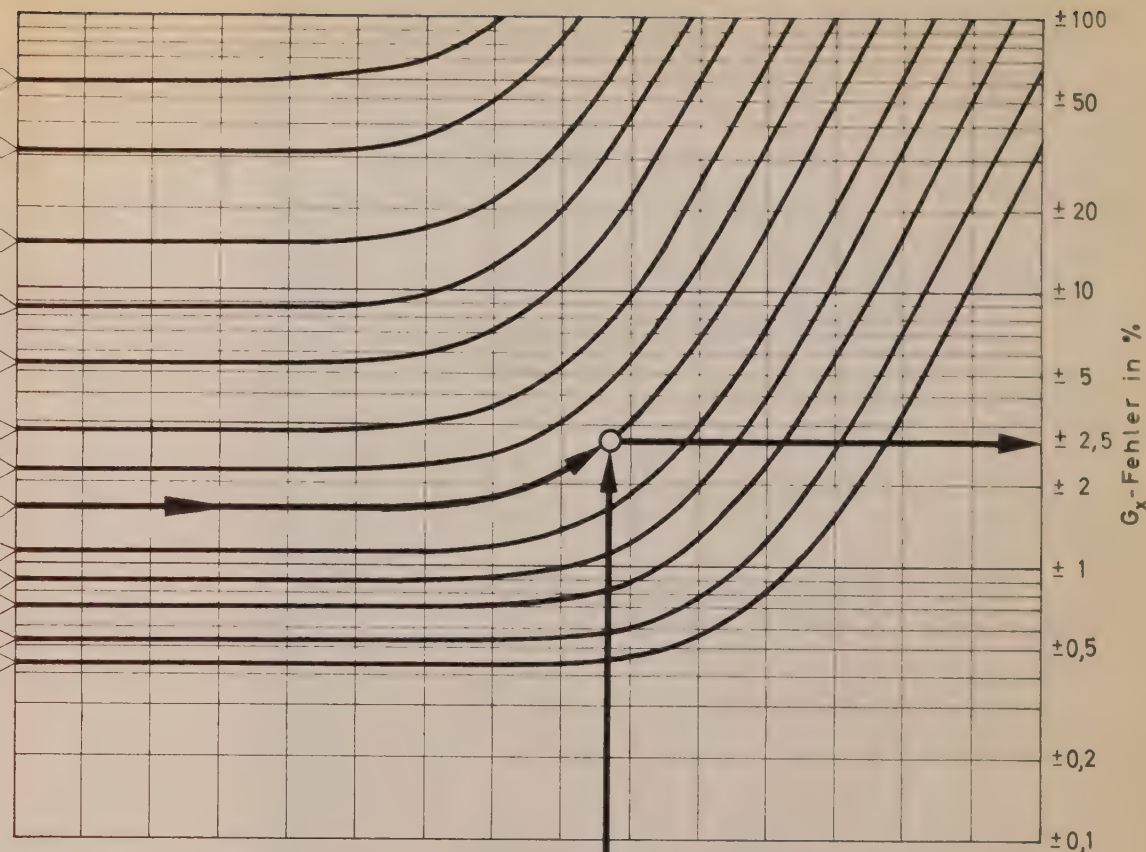


C-Gesamtfehler im Bereich 1000 μF
Temperaturbereich +10°...+30°C

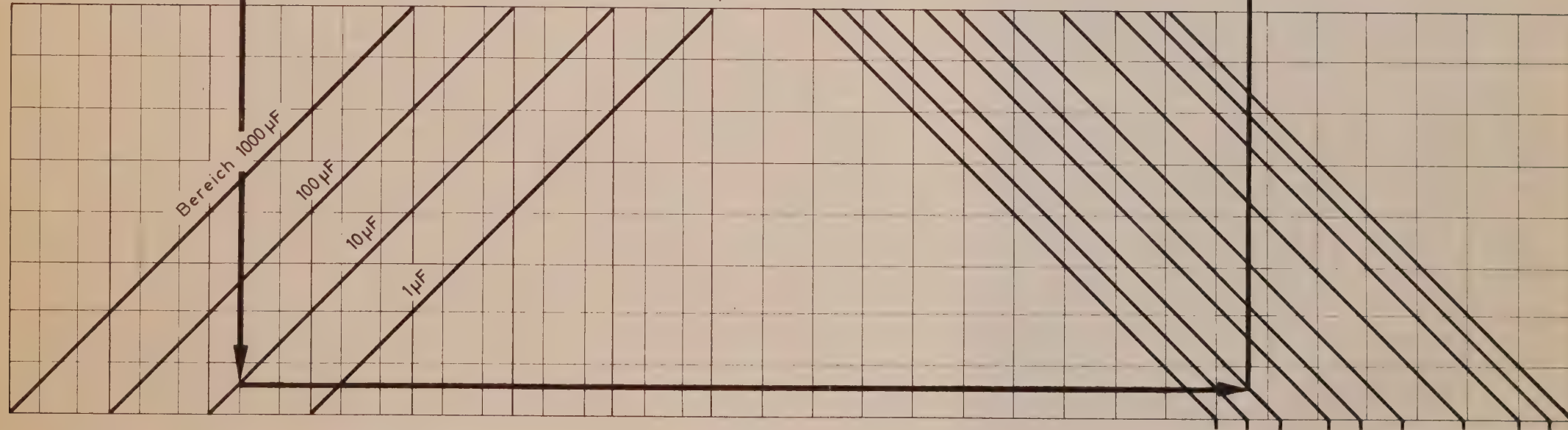
Meßbeispiel
 $C = 5 \mu\text{F}$
 $G_x = 200 \mu\text{S}$
 $f = 200 \text{ Hz}$
 Bereich $10 \mu\text{F}$

G_x -Parameter gültig für jeweils eine Kurve

C-Bereiche			
1 μF	10 μF	100 μF	1000 μF
100 nS	1 μS	10 μS	100 μS
200 nS	2 μS	20 μS	200 μS
500 nS	5 μS	50 μS	500 μS
1 μS	10 μS	100 μS	1 mS
2 μS	20 μS	200 μS	2 mS
5 μS	50 μS	500 μS	5 mS
10 μS	100 μS	1 mS	10 mS
20 μS	200 μS	2 mS	20 mS
50 μS	500 μS	5 mS	50 mS
100 μS	1 mS	10 mS	100 mS
200 μS	2 mS	20 mS	200 mS
500 μS	5 mS	50 mS	500 mS
1 mS	10 mS	100 mS	1 S



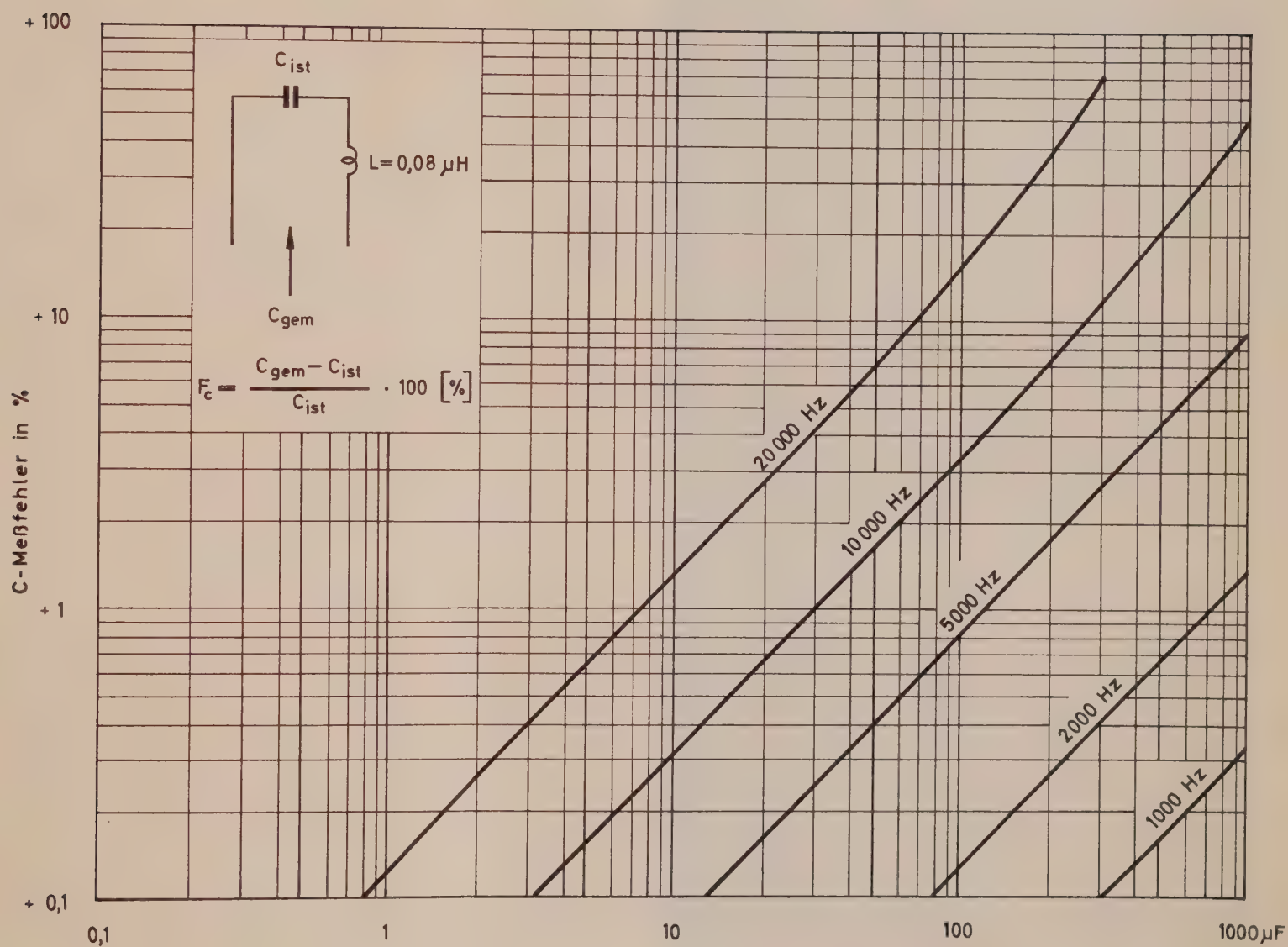
C_x
 1000 μF 100 μF 10 μF 1 μF 5 2 100 nF 10 nF 1 nF 100 pF



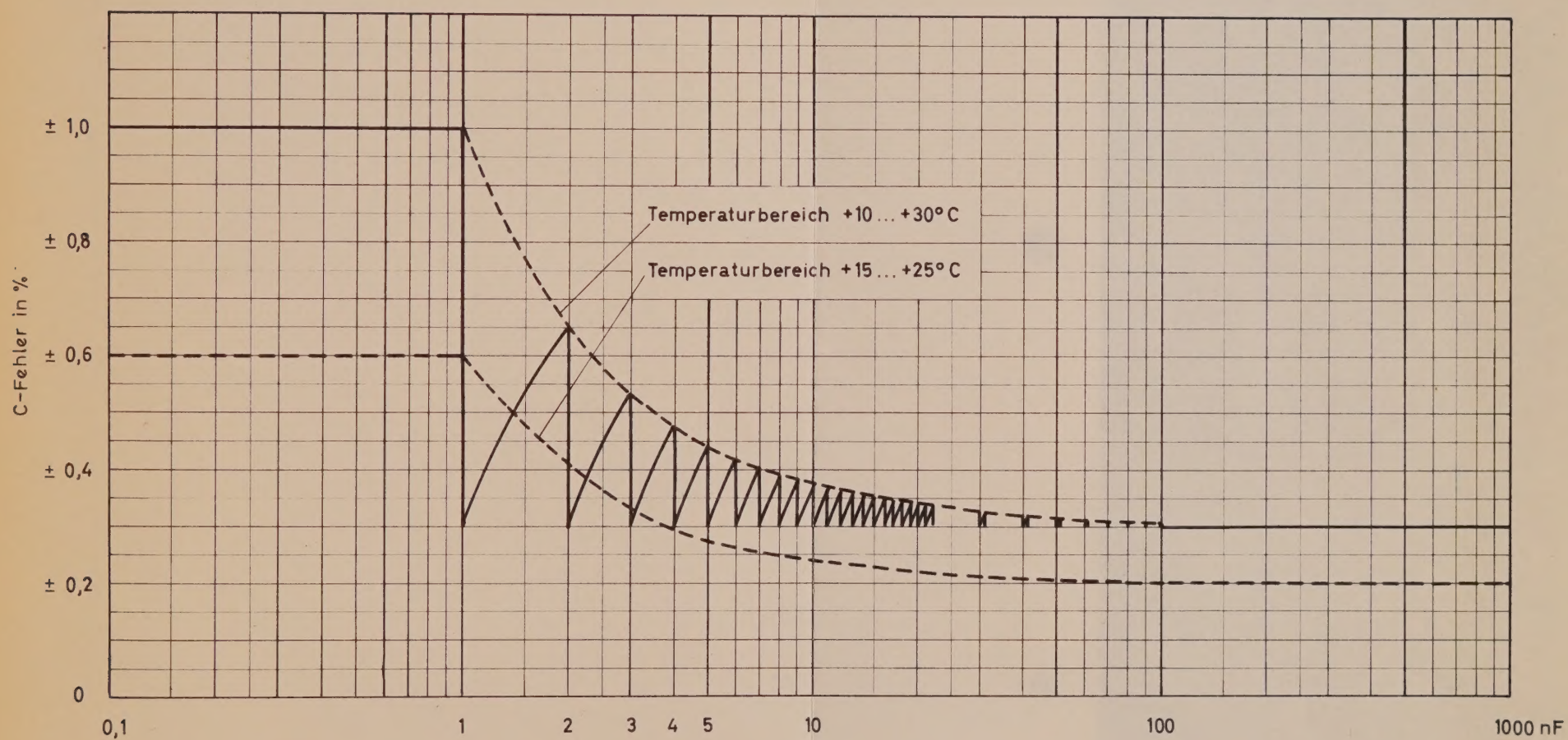
f-Parameter

Bereich	1 μF	Hz	50	100	200	500	1,5 k	4 k	20 k
Bereich	10 μF	Hz	50	100	200	500	1 k	2 k	5 k
Bereich	100 μF	Hz	50	100	200	400	800	1,9 k	3,7 k
Bereich	1000 μF	Hz	40	70	100	200	400	700	1 k

G_x -Meßfehler in den C-Bereichen 1...100 μF

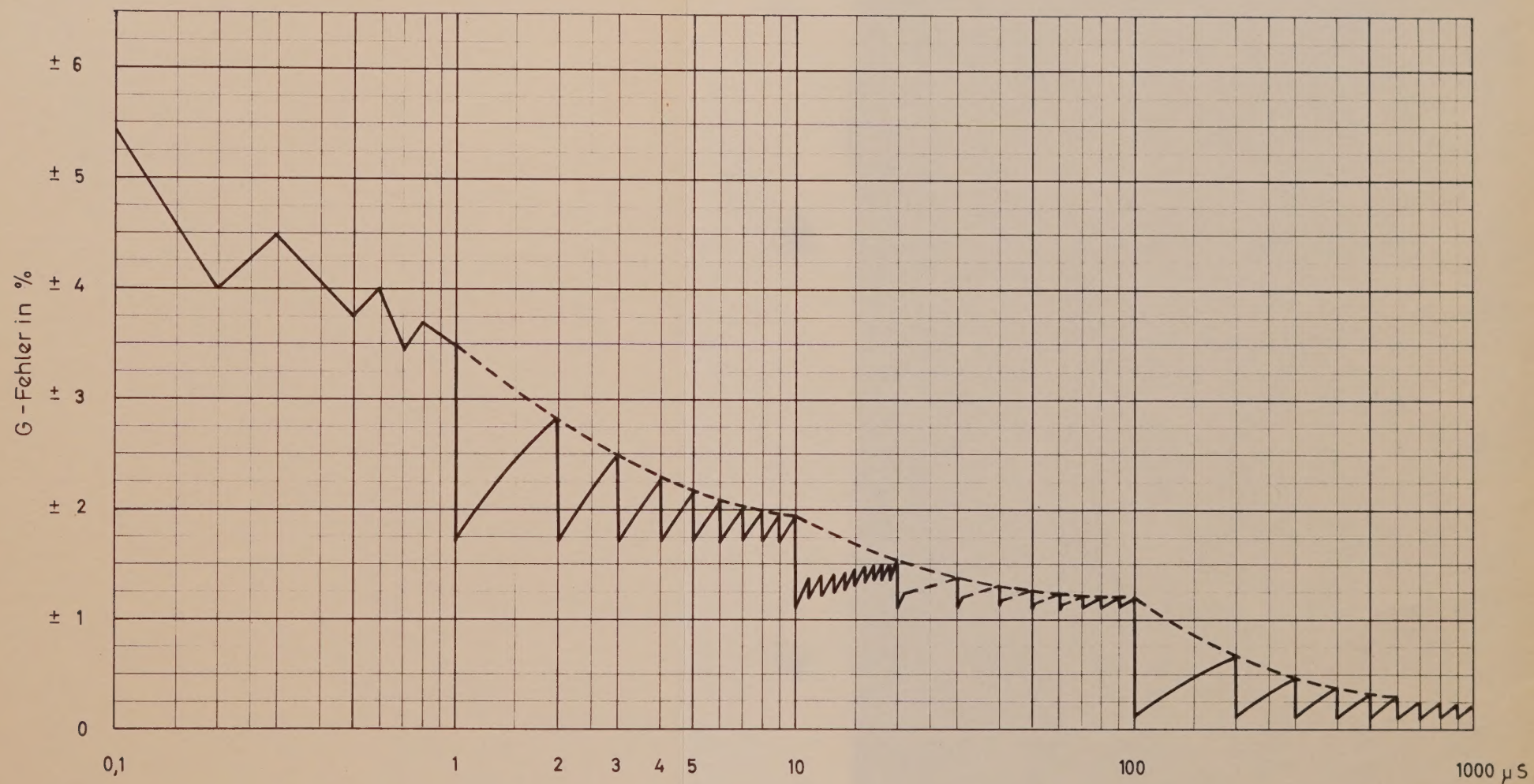


C - Meßfehler durch die
Induktivität der Geräteverdrahtung
(für $\tan \delta \leq 0,1$)



Fehler der C-Dekaden
(Leitwertdekaden abgeschaltet)





Fehler der G-Dekaden
(Temperaturbereich $+10 \dots +30^\circ C$)

